

Estudio de la lubricación por colchón de aire en el casco de un buque

Treball Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Pau Capella Costa

Dirigit per:
Joel Jurado Granados

Grau en Sistemes i Tecnologia Naval

Barcelona, 20 octubre de 2017

Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

Hoja de Cortesía



Agradecimientos

A tu, Lina, perquè tu m'ajudes amb tot el que pots i amb el que no pots també.

Gracies per confiar amb mi.

Als meus avis per ajudar-me amb el canal d'assaigs.

A la mama per creure'm i donar-me ànims.

Al meu pare, per tot el suport.

Resumen

En el presente Trabajo de Final de Grado, se realizará el estudio de unas de las formas de reducción de la resistencia al avance de última generación que se están implementando en algunos de los buques de la flota mundial, como lo es la lubricación del casco por aire.

Durante el presente, se planteará el porqué resulta tan necesario destinar tiempo y dinero a la investigación y desarrollo de técnicas que tengan como objetivo reducir la dificultad que el agua opone a los buques para avanzar a una determinada velocidad. Además de lo anterior, se aportará la base teórica necesaria para comprender los mecanismos de funcionamiento de la técnica de la lubricación por aire.

Actualmente, existen barcos que ya se les ha implementado el sistema en cuestión, de ellos se tratará de analizar cuál ha sido su impacto y a partir de ellos construir una línea maestra para mostrar la utilidad del tema expuesto.

Finalmente, se realizarán ensayos y simulaciones de casos reales para poder comprobar el funcionamiento del mismo, los resultados de los cuales deberán ser analizados en profundidad, dichos ensayos se centrarán en buques concretos.

Abstract

The aim of this End-of-Degree Project, is to analyze one of the ultimate ways to reduce the drag that have recently been installed in some of the ships around the globe. The technique object of this project is the air lubrication of the hull.

Along the project, it will be discussed the reason why is important to invest time and money to the investigation and development of this kind of techniques, that help to overcome the resistance made by the water. The necessary theoretical basis is going to be provided in order to undersand the way this technique works.

Nowadays, there are several vessels that have installed the air lubrication system on its hull, from that some conclusions would be obtained and it would be ascertained the use of this technique to make it straightforward its use.

Some experiments and trials will be carried out in order to sustain the theory provided initially, and understand in a tangible way all the abstract ideas exposed.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS.....	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
TABLA DE CONTENIDOS	V
LISTADO DE FIGURAS.....	VIII
LISTADO DE TABLAS	X
LISTADO DE ECUACIONES	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN	1
1.2 TEORÍAS FÍSICAS	5
1.3 INFLUENCIA DE LAS FORMAS DEL BUQUE EN LA RESISTENCIA AL AVANCE	14
2. DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA.....	16
2.1 REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA DE FRICCIÓN POR LUBRICACIÓN CON AIRE.....	16
2.2 INVESTIGACIONES REALIZADAS PARA LA REDUCCIÓN DE RESISTENCIA AL AVANCE POR LUBRIFICACIÓN POR AIRE	18
2.2 PROTOTIPOS INSTALADOS EN BARCOS	26
2.2.1 Till Deymann	26
2.2.2 M/S Harmony of the Seas	28
2.2.3 Astilleros y oficinas técnicas.....	30
2.2.4 Nuevos horizontes	33
3. ANÁLISIS DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN POR AIRE.....	35
3.1 INSTALACIÓN GENÉRICA	36
3.1.1 Equipos de compresión.....	37
3.1.2 Equipos de tratamiento del aire comprimido.....	38
3.1.3 Depósito acumulador	39
3.1.4 Válvulas de seguridad	39
3.1.5 Tuberías.....	40
3.2 INSTALACIÓN ESPECÍFICA	41
3.2.1 Punto de inyección.....	41
3.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	44
3.4 TIPOLOGÍA DE BUQUES	45

4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN POR AIRE PARA UN BUQUE REAL	47
4.1 CONSIDERACIONES PREVIAS	48
4.2 ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO	49
4.2.1 Tuberías y accesorios para su instalación:	49
4.2.2 Compresor:.....	49
4.2.3 Otros accesorios necesarios para el funcionamiento.	50
5. R+I+D DE LA LUBRICACIÓN POR AIRE	52
5.1 GENERACIÓN DE MICROBURBUJAS.....	52
5.1.1 Generación de microburbujas mediante ultrasonidos	54
5.1.2 Generación de microburbujas mediante energía electrostática	55
5.1.3 Generación de microburbujas a través de pinturas	56
5.2 CONTROL DEL FLUJO	57
5.2.1 Control del flujo mecánicamente.....	57
5.2.2 Control del flujo mediante el uso del magnetismo	57
6. OTRAS UTILIDADES DE LA LUBRICACIÓN POR AIRE.....	58
7. ESTUDIO PRÁCTICO DE LAS TEORÍAS APORTADAS	60
7.1 CUESTIONES PREVIAS.....	60
7.1.1 Proceso constructivo de una maqueta del buque M/S Emma Maersk en 3D	61
7.1.2 Fecha y lugar de los ensayos realizados	67
7.1.3 Instrumentos de medida usados en los ensayos	69
7.2 ENSAYOS REALIZADOS.....	71
7.2.1 Ensayos de generación de microburbujas	71
7.2.2 Ensayos con placa plana	75
7.2.3 Ensayos con modelo a escala	79
7.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	82
7.3.1 Análisis del punto de inyección.....	85
7.3.2 Análisis del ensayo de microburbujas	87
7.4 MEJORAS EN EL PROCESO EXPERIMENTAL	89
8. OTROS ENSAYOS A REALIZAR	91
8.1 CONSIDERACIONES	91
8.1.1 Ensayo del casco con cavidades de aire	91
8.1.2 Ensayo del casco con capa de aire.....	92
8.1.3 Ensayo de la navegabilidad y maniobrabilidad	93

CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	97
ANNEXO 1: DIAGRAMA UNIFILAR SISTEMA COMPRIMIDO	99
ANNEXO 2. PLANO DE DISPOSICIÓN DE EQUIPOS.....	100

Listado de Figuras

Figura 1. Compartiva de las emisiones de gases contaminantes (Fuente: Internet).....	1
Figura 2. Diagrama de distribución de presiones en un flujo ideal.....	7
Figura 3. Diagrama de presiones en un flujo con viscosidad.....	8
Figura 4. Evolución de los perfiles	11
Figura 5. Comparativa del comportamiento de los fluidos (Fuente: Propia).....	12
Figura 6. Comportamiento del fluido con desprendimiento de capa límite.....	13
Figura 7. Esquema del ensayo.....	18
Figura 8. Ubicación transductores.....	21
Figura 9. Esquema de los fenómenos a escala.....	22
Figura 10. Ejemplo de ensayo de Taylor-Coutte	23
Figura 11. Imagen del buque "Till Deymann"	26
Figura 12. M/S Harmony of the Seas	28
Figura 13. Diagrama de funcionamiento del dispositivo Air-Step®	30
Figura 14. Esquema de funcionamiento del sistema MALS	31
Figura 15. M/S Yamatai	32
Figura 16. Propuesta de la naviera Stena de construcción de cavidades de aire.....	34
Figura 17. Ejemplo de una caja de mar.....	42
Figura 18. Ejemplo de una toma de mar de un barco de dimensiones inferiores.....	42
Figura 19. Ejemplo de aplicación	46
Figura 20. M/S Emma Maersk.....	47
Figura 21. Accesorios y tuberías Air-Pro®	49
Figura 22. Compresor de aire Josval, modelo Mistral	50
Figura 23. Esquema funcionamiento energía electrostática a través de un piezoeléctrico	55
Figura 24. Perfil de velocidades de la tubería	58
Figura 25. Disposición de los planos del buque	63
Figura 26. Curvas de la zona de proa	63
Figura 27. Curvas de la zona de popa	64
Figura 28. Superficie del casco en su totalidad	64
Figura 29. Buque en sólido, cortado por las superficies descritas	65
Figura 30. Sólido vaciado con refuerzos	65

Figura 31. Proceso de impresión de la maqueta	66
Figura 32. Modelo impreso	67
Figura 33. Construcción del canal de ensayos	67
Figura 34. Canal de ensayos finalizado	68
Figura 35. Taladro con rollo de Nylon	68
Figura 36. Dinamómetro usado para mediciones	69
Figura 37. Recipiente donde se lleva a cabo el ensayo	71
Figura 38. Configuración del compresor	72
Figura 39. Burbujas generadas por el compresor y material poroso	73
Figura 40. Generación por electrolisis de microburbujas	73
Figura 41. Generación de microburbujas tras aplicar sal	74
Figura 42. Lectura del multímetro	74
Figura 43. Comparación de los resultados obtenidos	75
Figura 44. Gráfica de los resultados obtenidos	77
Figura 45. Disposición aproximada del ensayo	77
Figura 46. Gráfica de los resultados obtenidos	78
Figura 47. Gráfica de los resultados obtenidos	81
Figura 48. Disposición aproximada de los ánodos durante el ensayo	81
Figura 49. Gráfico de los resultados obtenidos en relacion con R_n	84
Figura 50. Gráficas de las líneas ITTC	84
Figura 51. Gráfica CT vs. R_n	85
Figura 52. Microburbujas generadas a 2,80A	87

Listado de tablas

Tabla 1. Comparación del tamaño de las burbujas según condiciones de ensayo	19
Tabla 2. Resultados ensayos de placa plana sin burbujas	76
Tabla 3. Resultados ensayos de placa plana con burbujas	78
Tabla 4. Resultados ensayo con modelo sin burbujas	80
Tabla 5. Resultados ensayo de placa plana sin burbujas	83
Tabla 6. Resultados ensayo placa plana con burbujas	83

Listado de ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación propuesta por Tanaka	9
Ecuación 2. Aproximación para el calculo del coeficiente K	9
Ecuación 3. Ecuación del factor de forma.....	10
Ecuación 4. Ecuación para el cálculo de la tensión	11
Ecuación 5. Coeficiente adimensional de la resistencia total al avance.....	82
Ecuación 6. Número de Reynolds	82
Ecuación 7. Número de Froude.....	82
Ecuación 8. Fórmulas de la ITTC	83

1. Introducció

1.1 Contextualització

El interés que ha llevado a desarrollar este trabajo viene motivado por la necesidad de encontrar una manera de reducir el consumo de combustible en los buques, habiendo sendos motivos para buscar una solución a dicha proposición, como siguen a continuación.

Empezando por la búsqueda de un transporte limpio medioambientalmente hablando y siendo el transporte marítimo uno de los transportes que encabezan esta clasificación, desde el punto de vista de la emisión relativa de gases contaminantes; se toma el gas Dióxido de Carbono (CO₂) como referencia para medir la presencia de agentes dañinos en el aire, ya que es uno de los principales gases perjudiciales emitidos a la atmosfera. Por lo que, midiendo los gramos de Dióxido de Carbono (CO₂) emitidos en relación a las toneladas de mercancía transportadas por los buques en 1 kilómetro, resulta ser éste transporte el más respetuoso con el medio ambiente, en este aspecto, como se puede comprobar en la siguiente gráfica.

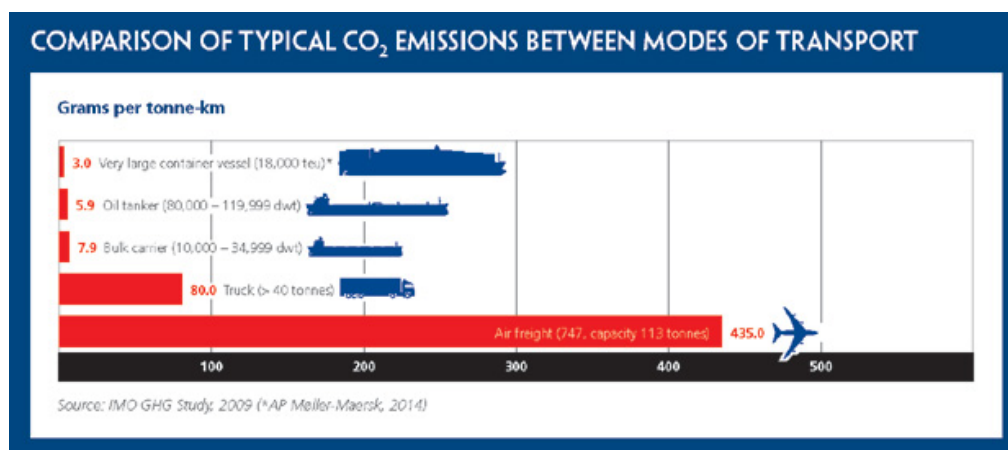


Figura 1. Comparativa de las emisiones de gases contaminantes (Fuente: Internet)

No siendo la antedicha afirmación una causa para dejar de buscar formas más limpias de transporte, sino una motivación para seguir investigando y buscando que el transporte marítimo sea un medio de transporte respetuoso con el medio ambiente ya que, a fin de cuentas en números absolutos se acaban emitiendo muchas toneladas de gases nocivos.

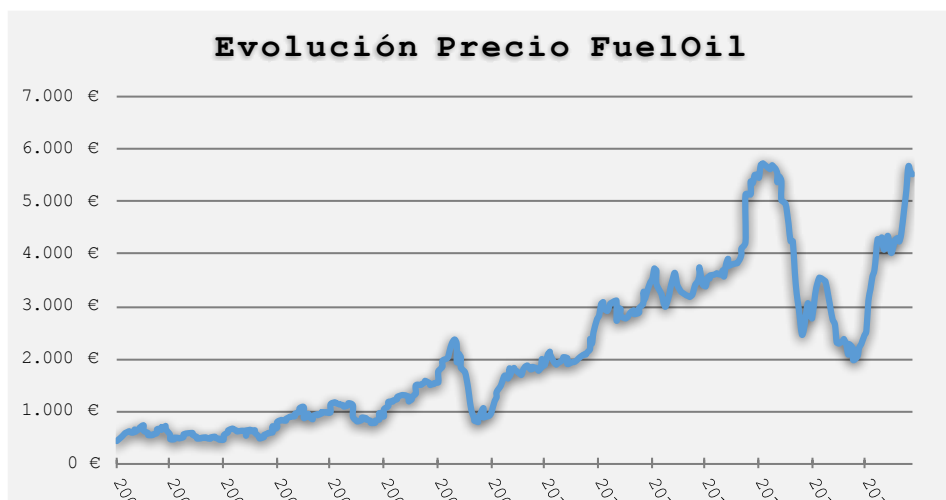
Aún así, el tipo de combustible necesario para que los buques puedan navegar dentro de unos parámetros económicos favorables es el FuelOil, un tipo de combustible pesado y altamente contaminante procedente del residuo de la refinación del petróleo, usado por su bajo precio de compra.

A modo de ejemplo y para establecer una base numérica de lo anteriormente comentado, para un buque tipo VLCC¹ (Very Large Crude Carrier) con un peso muerto de 280.000 Toneladas, peso en rosca de 40.000 Toneladas, que puede alcanzar una velocidad de hasta 15 nudos y disponiendo de un medio propulsivo de 30.000 kW, se puede comprobar que un medio de transporte que su capacidad se sitúa en siete veces su peso en rosca, si lo comparamos con cualquier otro modo de terrestre o bien aéreo, no se encontrarán cifras como las anteriormente expuestas que puedan permitir un ahorro de la combustible de esta forma.

Otro de los motivos por los que se debería encontrar una forma de reducir el consumo de combustible en los buques es, conseguir que el negocio marítimo sea económicamente factible.

Sabiendo de la importancia económica mundial de este sector, de la cantidad de dinero que éste mueve en todo el mundo y permitiendo conexiones de larga distancia en un plazo de tiempo relativamente corto, se hallan motivos suficientes para dar con una solución que permita seguir operando los buques dentro de unos márgenes asumibles desde el punto de vista de costes operativos. A tenor de ello, el precio del combustible es considerado como uno de los principales factores problemáticos por los que el negocio marítimo puede perder una de sus principales características, que es el precio reducido del flete en comparación con otras modalidades de transporte. Se debería encontrar una forma de reducir el consumo de combustible, ya que es el único recurso del que se dispone para tratar de mantener los costes operativos dentro de unos rangos válidos. Comprobamos mediante la siguiente gráfica que el precio del Fuel Oil (combustible más comúnmente usado actualmente en los buques) se encuentra en niveles muy altos, como muestra a continuación:

¹ Buques para el transporte de petróleo y derivados, con un arqueo bruto superior a 200.000 Toneladas.



Gràfica 1. Evolució del preu del petroli des del 2002 fins a l'actualitat
(Fuente: Propia)

En la gràfica anterior se puede comprobar como el precio del combustible ha experimentado un aumento muy importante de precio, resultando en una reducción excesiva de los márgenes de beneficios de los operadores de los buques.

Finalmente, y además de los motivos expuestos con anterioridad, sería importante encontrar desde el punto tecnológico mejoras que nos permitan disminuir el consumo de combustible respetando y cumpliendo las exigencias impuestas por las Administraciones orientadas a obtener sistemas propulsivos más eficientes. Por ello, se deben buscar formas que ayuden a mejorar el rendimiento propulsivo siendo, en el caso de los buques, la resistencia al avance que ofrece el agua uno de los caballos de batalla que la ingeniería naval debe tratar de mitigar. Si esto fuera posible, tratando de reducir la resistencia que presenta el agua al avance, se podría ver reducido el consumo de combustible.

A tenor de las motivaciones mostradas, se llega a la conclusión de que si se propone el objetivo de reducir el consumo de combustible durante la operativa del buque, se deberá analizar cuáles son los fenómenos que más influyen, es decir, en qué se invierte el combustible que llena los tanques de los buques.

En primer lugar, el combustible tiene el objetivo de alimentar la propulsión del buque (motor o motores), dotándolo de maniobrabilidad y gobierno, esto se consigue venciendo la resistencia al avance del buque opuesta por el agua. En segundo lugar, se utiliza para accionar los generadores de electricidad, para dotar al buque de suministro eléctrico a todos los equipos que

lo requieran. Finalmente, como función general y más extensa, permite tener el buque de forma operativa.

Analizando las afirmaciones anteriores, se aprecia que la mayor inversión de combustible se destina a vencer la resistencia al avance originada por el agua; convirtiéndose dicha resistencia en el enemigo a batir. No obstante, con los medios tecnológicos actuales no se puede hacer desaparecer, sino que deben encontrarse formas para mitigar este fenómeno originado por la propia naturaleza del agua.

Estos medios tecnológicos buscados deben permitir hallar formas que posibiliten una disminución en la potencia instalada necesaria para que las embarcaciones puedan vencer gran parte la resistencia ofrecida por el agua, marcándose este hecho como la meta a cruzar.

Como se puede comprobar, no es un problema nuevo de la industria marítima, de hecho, es un problema reincidente a lo largo de la historia ya que, en cada época de su existencia, la obtención de barcos eficientes, entendiéndose eficiencia de forma distinta en cada uno de los momentos históricos, ha sido una obsesión para sus diseñadores.

Durante las épocas iniciales, la eficiencia se entendía simplemente como poder maniobrar y gobernar el buque de una manera básica, pasado el tiempo y gracias a la evolución de la técnica, se han logrado superar los mencionados obstáculos, hasta conseguir buques que se gobiernan de forma autónoma, redefiniendo de esta forma el concepto de eficiencia. Actualmente, la mejora de la eficiencia se centra en buscar a través de la tecnología actual, el problema que se viene planteando.

1.2 Teorías físicas

El estudio del comportamiento estático y dinámico recae sobre la Mecánica de Fluidos. Dentro de la Mecánica de Medios Continuos, es el campo de la Mecánica de Fluidos el encargado de estudiar el comportamiento de fluidos en reposo y movimiento.

En concreto para el buque, siendo un entorno peculiar que está en contacto con dos medios diferenciados, agua y aire.

El estudio del comportamiento estático del buque, que analiza las fuerzas que actúan sobre él en situación de equilibrio, se conoce como la hidrostática del buque. Por otro lado, el comportamiento del fluido alrededor de la carena cuando el buque está en movimiento se conoce como la hidrodinámica del buque.

Uno de los conceptos más usados, ha sido el de resistencia al avance, si tomamos la definición del libro Bonilla cita lo siguiente: “La resistencia al avance de un buque a una determinada velocidad es la fuerza que se opone el fluido al movimiento.”

Para poder estudiar este fenómeno, se ha tratado de obtener modelos para el estudio de la resistencia al avance. Las principales teorías / hipótesis, son:

- A. Hipótesis de Froude: Se desglosa la resistencia al avance en la resistencia de fricción por placa plana equivalente, además de una resistencia residual. Entendiendo placa plana equivalente como aquella dotada de la misma eslora y superficie mojada que la del buque. Entendiendo la resistencia residual como todos los otros conceptos que no se incluyen en la definición de resistencia de fricción por placa plana.

- B. Hipótesis de Hughes: Siendo la más usada en la actualidad, divide la resistencia total al avance en la resistencia de origen viscoso debida a la naturaleza viscosa del fluido y la resistencia por formación de olas.

Los barcos están envueltos por un ambiente que no solamente es agua, sino que también está presente la existencia de aire. Por lo que por otra parte se debe estudiar la resistencia del buque debida al agua, siendo la resistencia originada por el aire muy pequeña, en muchos casos despreciable, a no ser que se trate de buques con grandes superficies de obra muerta.

En el estudio de la resistencia al avance del buque se comprueba que existe una parte muy importante de la resistencia total depende de la resistencia viscosa, que a su vez, se puede dividir en resistencia viscosa de presión y de fricción. Y finalmente, podemos categorizar la resistencia viscosa de fricción en resistencia viscosa de fricción de placa plana y debido a la curvatura de las formas del buque.

Tras el análisis adimensional de los factores que intervienen en la resistencia total al avance del buque, resulta que la resistencia está íntimamente ligada al Número de Froude, al Número de Reynolds.

Analizando los resultados obtenidos, se comprueba que el factor que depende del Número de Reynolds, gobernará los fenómenos viscosos; por lo que el factor que dependerá del Número de Froude, ya que este incluye factores como la gravedad, gobernará fenómenos relacionados con la superficie libre, y por consiguiente, la formación de olas.

Como se ha comentado, la resistencia viscosa, que a su vez se subdivide en resistencia de fricción y resistencia de presión de origen viscoso, desglosándose a su vez en, resistencia de fricción de superficie curva (un tipo de resistencia de fricción) y resistencia de presión de origen viscoso (con y sin separación de capa límite), englobando todos estos conceptos en el de resistencia de formas.

En concreto, la resistencia por curvatura de las formas se subdivide en resistencia fricción de superficie curva transversal y longitudinal. El efecto causado por la curvatura transversal (debido a la curvatura de las cuadernas) al flujo, tiene como efecto principal la disminución de la capa límite, en relación a la placa plana. Por el contrario, la curvatura longitudinal (debido a la curvatura de las líneas de agua) al fluido, genera un aumento de segundo orden de la resistencia al avance en relación a la placa plana. Además de lo anterior, debido al tipo de curvatura, se genera la resistencia de presión de origen viscoso.

Para poder comprender este tipo de resistencia, primero se debe imaginar un cuerpo avanzando a una velocidad V rodeado de un fluido ideal (sin viscosidad), donde los puntos A y C son puntos de remanso, lo que significa que la velocidad del fluido es cero y en consecuencia, las presiones son máximas.

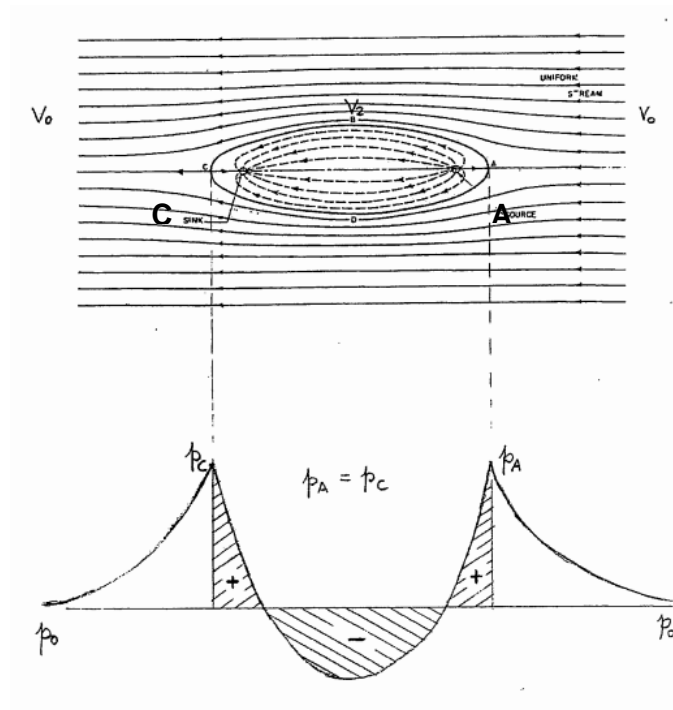


Figura 2. Diagrama de distribución de presiones en un flujo ideal

Tal y como se puede observar en las imágenes anteriores, en relación a las líneas de flujo, la velocidad es máxima en la parte central de las formas del buque, obteniéndose las presiones mínimas absolutas, volviendo a desacelerarse hasta llegar al punto C, con velocidad cero y velocidad máxima.

No obstante, el hecho de tener picos de presión máxima idénticos a la parte de proa y de popa, solamente sucede si el fluido es ideal, es decir, sin viscosidad. Por lo que los fluidos reales, sí tienen viscosidad, no se observan estos fenómenos.

En el caso de los fluidos reales, si disponemos un cuerpo sumergido en un fluido de dichas características, se desarrolla un fenómeno consecuencia directa de la viscosidad del fluido conocido como capa límite. En el interior de la capa límite las velocidades son menores que si el fluido en cuestión se tratara de un fluido ideal, en el exterior de dicha capa límite, el fluido se comporta como un fluido ideal.

Como se puede ver en la siguiente figura, las líneas de corriente en la parte de popa quedan más abiertas, es decir, con una menor curvatura, lo que implica una mayor velocidad siendo la presión en el Punto C, menor que la presión en el Punto A.

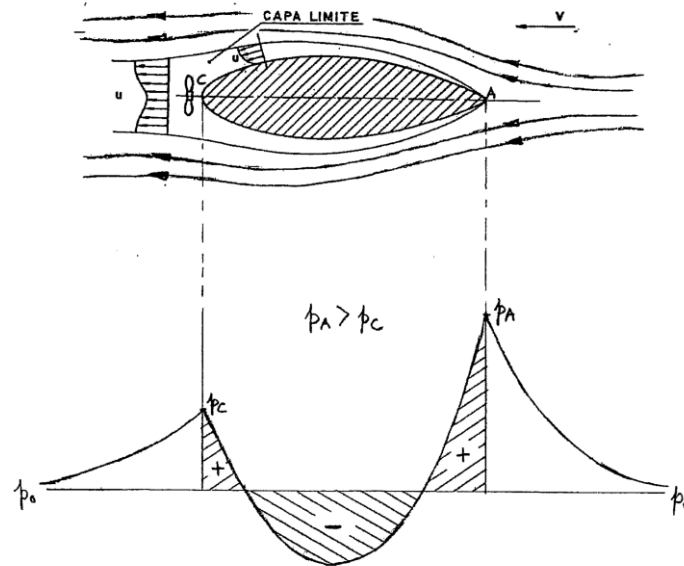


Figura 3. Diagrama de presiones en un flujo con viscosidad

Si se compara el gráfico de presiones de la figura 2 con el gráfico de presiones de la figura 3, se llega rápidamente a la conclusión de que existirá un diferencial de presiones positivo en dirección proa-popa, generando un tipo de resistencia íntimamente ligada con la viscosidad del fluido, a la que llamamos Resistencia de presión de origen viscoso.

Recibe dicho nombre ya que es una resistencia originada por esfuerzos normales (la presión), pero cuyo origen deriva de la viscosidad del fluido, generando la mencionada capa límite alrededor de las formas longitudinales del casco del buque (origen viscoso).

Para poder cuantificarla, el profesor Tanaka llegó a la conclusión que el coeficiente de Resistencia de presión de origen viscoso es proporcional al coeficiente de fricción de placa plana, como se muestra a continuación:

$$\frac{R_{pov}}{1/2 \rho S V^2} = C_{pov} = k C_{fpp}$$

Ecuación 1. Ecuación propuesta por Tanaka

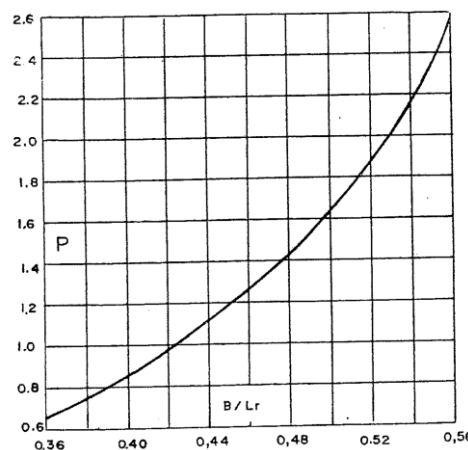
La aproximación para el coeficiente (k), fue realizado por Sasajima y Tanaka, y se expresa como:

$$k = \sqrt{\frac{\Delta}{\rho L^3}} \left(2.2 C_B + \frac{P}{C_B} \right)$$

Ecuación 2. Aproximación para el calculo del coeficiente K

De dicha ecuación, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Para un mismo desplazamiento (Δ), interesa tener el máximo de eslora (L) posible.
- Siguiendo la gráfica para determinar el factor P, se observa que si se aumenta la manga B, también lo hará el Coeficiente de Resistencia de presión por origen viscoso.
- Apuntando a la misma gráfica, si se disminuye la longitud del cuerpo de salida (L_r), aumenta P, y en consecuencia lo hará el Coeficiente de Resistencia de presión por origen viscoso; interesa tener formas de cuerpos de salida finos y largos.



Gráfica 2. Comportamiento del factor P

Como conclusión a todo lo anterior, se buscarán buques con esloras lo más elevadas posible que no pongan en compromiso la estabilidad del buque, coeficientes de bloque bajos, aspecto que perjudica a la capacidad de carga, y sobre todo se buscarán formas largas de salida en los cuerpos de salida.

Como se ha visto en el estudio, la resistencia viscosa resulta de la suma de la resistencia de fricción por placa plana y de la resistencia de formas.

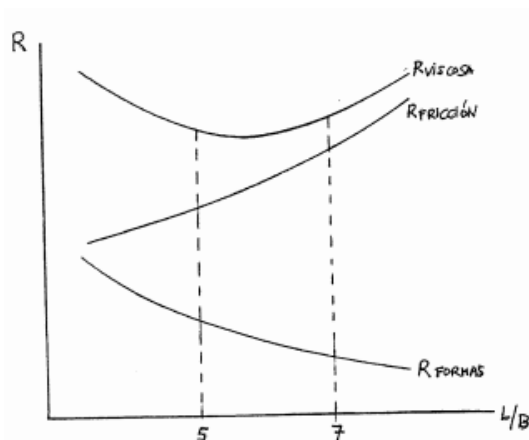
Para poder diferenciar las placas planas de las formas, se utiliza un factor que nos indica cuanto diferente es una forma de una placa plana, dicho factor recibe el nombre de Factor de Forma. Es importante destacar que el Factor de Forma para placas planas toma un valor de cero y se expresa como sigue:

$$r \text{ (factor de forma)} = (1 + k)$$

Ecuación 3. Ecuación del factor de forma

Estableciéndose este párrafo como sumario de lo comentado anteriormente, se ha comprobado que la resistencia de fricción aumenta al mismo tiempo que lo hace la superficie mojada. También se ha comentado que es de interés tener esloras lo más grandes posibles, para tener un buque lo más esvelto posible y, debido a ello, tener una resistencia por formas reducida.

Es aquí donde resulta el problema ya que, aumentando la eslora (L), también lo hace la superficie mojada, es decir, que si se quiere reducir la resistencia por formas se aumentará la resistencia por fricción.



Gráfica 3. Comportamiento de la resistencia y sus componentes

Tras la realización de ensayos con cuerpos de formas variadas, se acaba estableciendo un rango de la relación eslora/manga (L/B) en que la resistencia viscosa es mínima. Debido al comportamiento antagónico de las componentes de la resistencia viscosa, se encuentra un rango en que la mencionada resistencia es mínima. Este se establece en: $5 \leq L/B \leq 7$.

Anteriormente, se ha mencionado los efectos causados por la creación de la capa límite alrededor de las formas del buque, causando un diferencial de velocidades entre la pared del buque y el fluido potencial, este fenómeno es debido a la viscosidad del fluido.

Dicho diferencial de velocidades crea lo que se conoce como perfil de velocidades, donde las partículas del líquido más cercano a las paredes del buque tienen una velocidad nula, lo que significa que las partículas están pegadas a la pared del buque y, a medida que las partículas se encuentran en una distancia más lejana de la pared del buque, la velocidad se incrementa hasta que se abandona la zona influenciada por la capa límite en que el fluido no queda afectado por la interacción con las paredes del buque.

Si se estudian las fuerzas que actúan sobre la partícula que se encuentra pegada a la pared del buque, se encuentra la fuerza que actúa de forma normal, la presión, y también se deduce el esfuerzo cortante (τ) que puede expresarse de la siguiente forma:

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \rightarrow \frac{du}{dy} = \text{Pendiente del perfil de velocidades}$$

Ecuación 4. Ecuación para el cálculo de la tensión

Debido a que en las zonas más cercanas a la pared del buque las partículas se encuentran paradas, la pendiente del perfil de velocidades en la zona mencionada es mayor, por lo que es una zona en que los esfuerzos son mayores, generando mayores fuerzas de fricción. Por todo ello, las partículas cercanas a la pared corren el riesgo de dejar de detenerse y empezarse a mover en dirección contraria.

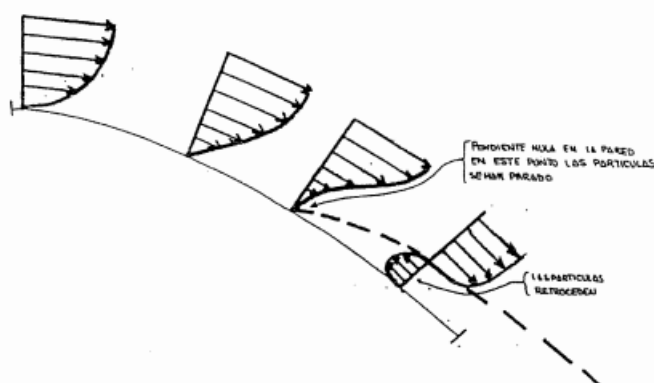


Figura 4. Evolución de los perfiles

Cuando el fluido empieza a moverse en sentido contrario, se establece una zona en la que la velocidad es nula, donde se separa el fluido que se desplaza en el sentido natural y el fluido que circula en dirección contraria, siendo aplicable de forma tan clara solo para fluidos ideales. En el caso de fluidos reales, en vez de cambio de sentido de circulación del fluido, se generan vórtices o torbellinos.

El fenómeno de aparición de vórtices o torbellinos se conoce como la separación de la capa límite. Los vórtices tienen altas velocidades en su centro y presiones bajas, del orden de la presión atmosférica. Se genera de esta forma, una disminución notoria de la presión a popa y acentuando el diferencial de presiones entre proa y popa, lo que resulta en un aumento aun mayor de la resistencia de presión de origen viscoso.

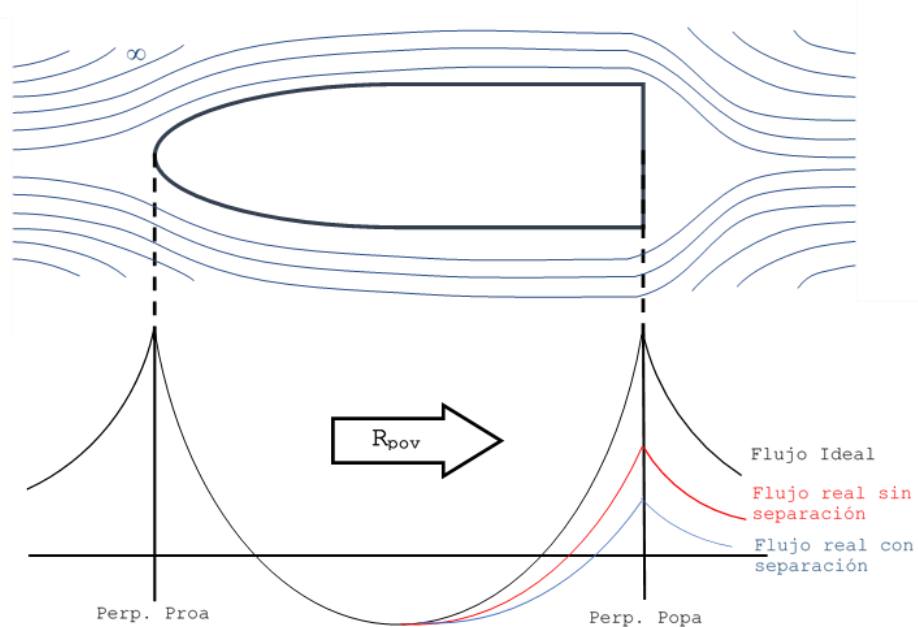


Figura 5. Comparativa del comportamiento de los fluidos (Fuente: Propia)

Cabe indicar que la pendiente del perfil de velocidades debe ser siempre el objetivo, en caso contrario, tendremos la aparición de lo que hemos llamado anteriormente, separación de la capa límite. Finalmente, recordar que el esfuerzo cortante τ y que el mencionado esfuerzo, no depende más que del número de Reynolds y que, para una velocidad constante, el esfuerzo constante depende solamente de la distancia a la proa, por lo que el esfuerzo no depende en ninguna circunstancia de la geometría o de la forma del cuerpo.

Sin embargo, la presión sí tiene una dependencia directa con la geometría del cuerpo ya que si el cuerpo tiene una geometría que aumenta el gradiente de presiones de una forma abrupta, las

partícules transformen su energia cinètica en energia potencial, podent donar lloc a su parada total. De aquí surge la necessitat de analitzar les formes dels buques.

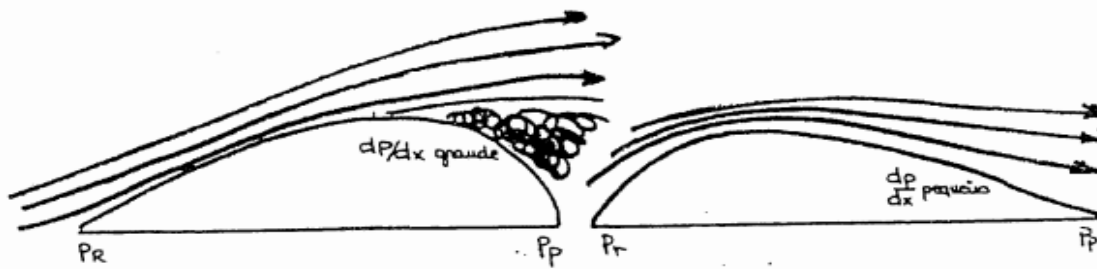


Figura 6. Comportamiento del fluido con desprendimiento de capa límite

En la anterior imagen, se pueden comprobar dos perfiles, el primero en el que el gradiente de presiones es elevado, por lo que es más propenso a tener desprendimiento de capa límite.

Para poder determinar si un buque va a tener desprendimiento de capa límite, se puede estudiar mediante el ensayo en el Canal, en él se observa mediante el posicionamiento de hilos de lana sobre la superficie del casco a ensayar el sentido del flujo en los alrededores del casco. En la región en que los hilos no muestran un sentido definido, es sinónimo de la aparición del desprendimiento de la capa límite. Si bien, la aparición de la separación de la capa límite en los modelos a escala, no permite afirmar que también se hallará en el modelo real, pero si al contrario, no aparece separación de la capa límite en el modelo, se puede asegurar que tampoco aparecerá en el modelo real.

El interés de estudio del desprendimiento de la capa límite, surge en el momento que se percata que cualquier desprendimiento de la capa límite, significa un gran aumento de la resistencia al avance del buque.

1.3 Influencia de las formas del buque en la resistencia al avance

Se pueden establecer unos criterios de diseño según las dimensiones principales del buque. Por ejemplo, la dimensión más importante de un buque, la eslora, siendo la primera magnitud que fijar, ya que todas las otras dimensiones se referenciarán a esta. Dicha magnitud afecta directamente a la resistencia de fricción ya que, a mayor eslora, tendremos mayor superficie mojada, resultando en una mayor resistencia de fricción. Si bien, el aumento de la eslora es indirectamente proporcional a la resistencia de presión de origen viscoso, resultando el aumento de la resistencia viscosa en indeterminada ya que las dos componentes anteriores se comportan de forma antagónica. Finalmente, un aumento de la eslora disminuye de forma drástica la resistencia por formación de olas.

En el proceso de diseño, el siguiente paso tras la determinación de la eslora, es establecer una manga, influyendo directamente en la estabilidad transversal. Dicha magnitud, de igual forma que las anteriores, si se aumenta a su tiempo lo hace la superficie mojada, influye directamente con un aumento de la resistencia de fricción.

Manteniendo una eslora preestablecida, un aumento de la manga tiene como consecuencia un ligero aumento de la resistencia de presión de origen viscoso y se incrementa el riesgo de que se produzca separación de la capa límite. Al mismo tiempo, con una mayor manga, también aumentaremos la resistencia por formación de olas ya que la perturbación del agua será mayor.

En relación al calado, como indicado anteriormente, un incremento del calado generará un aumento de la resistencia por fricción, debido a la inflación de las dimensiones de la superficie mojada. El comportamiento de la resistencia de presión de origen viscoso es indeterminado, se debe tratar a modo de error-prueba. Finalmente, con la resistencia por formación de olas, se puede llegar a tener un ligero aumento, debido a la mayor perturbación de la superficie.

Como última dimensión a analizar, el coeficiente de bloque, el cual es usado para fijar las consideraciones hidrodinámicas y la capacidad de carga del buque. En relación con la resistencia de fricción, su comportamiento es indeterminado ya que incrementamos de una forma pequeña la superficie mojada.

Si bien, y en relación la resistencia de origen viscoso, cuanto más cerca de 1 está el valor del coeficiente de bloque, mayor es la semejanza del buque con un prisma de base cuadrada, por lo que el motivo aportado anteriormente, es justificación del aumento de la resistencia de presión

de origen viscoso. En relació amb la resistència per formació de ones, al tenir formes més plenes amb un major coeficient de bloque, se tenen majors perturbacions en la superfície lliure de l'aigua, donant lloc a un gran augment a la resistència per formació de ones.

Toda la informació aportada, ha d'establir-se com a base per començar a desenvolupar les tècniques indicades en aquest apartat per tractar de disminuir la resistència al avanç del vaixell. No obstant, s'ha de tenir clar com actuen cada una de les analitzades dimensions, aspectes relacionats amb la resistència, als quals se farà hincapié al llarg d'aquesta feina. Si bé, l'abast d'afectació amb la tècnica proposada queda limitada només a la resistència de fricció, ja que com es podrà demostrar les propostes realitzades no tenen efecte cap sobre la formació de ones o qualsevol altre fenomen que no tingui relació amb la fricció.

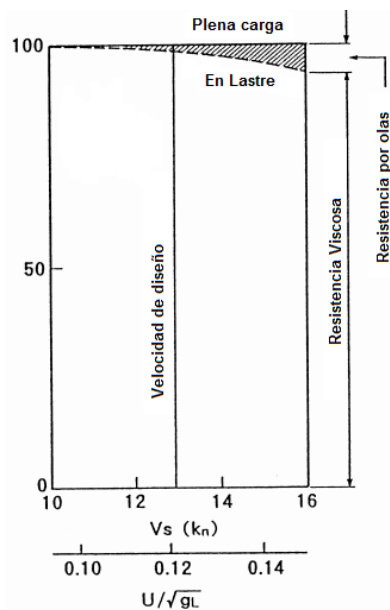
2. De la teoría a la práctica

2.1 Reducción de la resistencia de fricción por lubricación con aire

Debido que la resistencia es el principal factor que influye en la reducción de los costes operativos del buque y de las emisiones de CO₂, podríamos destacar dos formas de mitigar el fenómeno de la resistencia, como desarrollado en el apartado anterior. Entendemos que la resistencia está compuesta, tanto a nivel de cálculo como a nivel físico en dos grandes componentes.

A tenor de lo anterior, la resistencia por formación de olas viene dada por las formas de los buques y su eslora, que éstas a su tiempo vienen dada por la naturaleza del buque, es decir, son intrínsecas al fin para el que había sido diseñado. Sin embargo, llegados a cierto punto del proceso de diseño del buque, la modificación de sus líneas se convierte en una empresa complicada.

Según datos obtenidos del libro “Resistencia al avance del buque” escrito por el Profesor Antonio Baquero, Para un buque tipo VLCC, con una eslora de 320,- m, una manga de 60,- m y un puntal de 22,- m, a una velocidad de navegación de 14,57 nudos, se le establece un Número de Reynolds de $2,4 \times 10^9$, determinándose que la resistencia al avance podía establecerse de la siguiente forma.



Gráfica 4. Descomposición de la resistencia al avance en función de la velocidad

2. De la teoría a la práctica

Por todo ello, se deberán desarrollar técnicas para poder disminuir la resistencia de origen viscoso. Ya que, como se puede comprobar en la figura anterior, la resistencia por formación de olas es muy poco influyente en comparación con la resistencia de origen viscoso.

Una de las técnicas que actualmente se encuentra en desarrollo y sobre la cual trata este trabajo, es el uso del aire como lubricante teniendo como meta reducir la resistencia al avance de origen viscoso, específicamente la componente de fricción. Se toma el uso de esta técnica con motivo de la diferencia de viscosidades de ambos fluidos. El agua es 1.000 veces más viscosa que el aire, lo que significa que desplazarse a través de aire será mucho más fácil que hacerlo a través del agua.

Claro está que los buques no pueden dejar de fluir a través del agua, pero si se puede plantear la idea de insertar aire en la zona de contacto del casco del buque con el agua, con el objetivo de disminuir su dificultad al avanzar a través de ella. Esta dificultad, como ya comentado es la resistencia de fricción, que está ligada de forma clara y directa con la viscosidad del fluido. La aplicación de la lubricación por aire, se debe a que este puede proporcionar una disminución de la viscosidad efectiva del agua.

Para la aplicación del aire como lubricante, se han desarrollado tres formas de aplicación, la inyección de burbujas de aire en la capa límite, el uso de capas de aire en el fondo del buque y el uso de cavidades rellenas de aire en la parte inferior del casco del buque.

Estableciéndose que el objetivo de la inserción de aire para disminuir la resistencia de fricción es tratar de procurar que el agua no se encuentre en contacto directo con la superficie del buque.

2.2 Investigaciones realizadas para la reducción de resistencia al avance por lubricación por aire

A modo descriptivo se procederá con la explicación de los mecanismos de funcionamiento de las tres técnicas comentadas con anterioridad.

En primer lugar, la inyección de microburbujas dentro de la capa límite. Esta técnica se está estableciendo como una de las más prometedoras, ya que, los rangos de reducción de la resistencia al avance son mucho más elevados que otras técnicas, y como factor clave, no contamina el entorno en que se aplica. El motivo por el cual la presente técnica fue considerada como prometedora por los primeros investigadores, fue por los pensamientos basados en que, el casco de un mismo buque tiene menos resistencia en el aire que en el agua.

Estudios realizados por los profesores McCormick y Bhattacharyya, y según recoge el Vigésimo Simposio de Diseño y Construcción de Yate de Hiswa, los mencionados profesores descubrieron los efectos de la reducción de la fricción viscosa en 1.973, durante un experimento de un cuerpo de 3 pies, en el interior de un canal de ensayos, a una velocidad de 8,5 pies por segundo. El mencionado cuerpo se hallaba sumergido con el fin de eliminar la resistencia por formación de olas y comprobar solamente los efectos de la reducción por microburbujas. En el caso de este experimento, la generación de microburbujas se realizaba por electrólisis, y el gas resultante era hidrógeno (H_2).

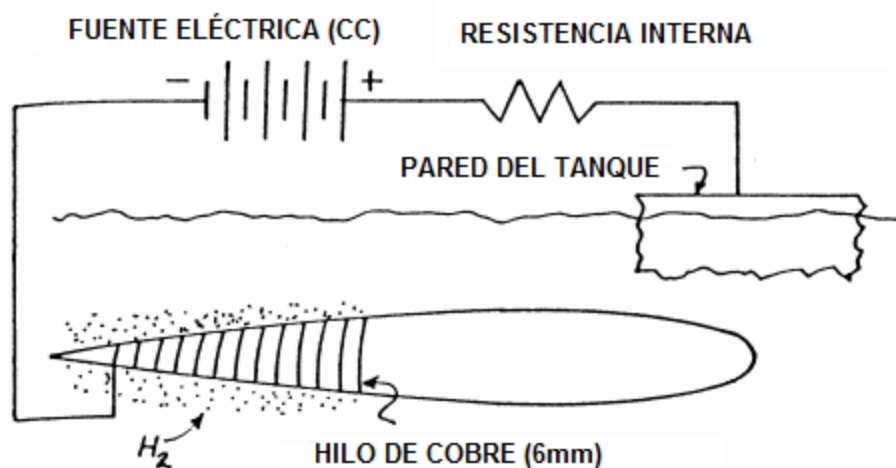


Figura 7. Esquema del ensayo

Los resultados del anterior ensayo fueron satisfactorios para la aplicación de microburbujas de Hidrógeno en el flujo sito alrededor de un cuerpo sólido, pero dicha aplicación queda limitada a

2. De la teoría a la práctica

un rango de Números de Reynolds reducidos, solamente en el rango de flujo laminar. La anterior afirmación debería considerar que al no tener Reynolds suficientes parejos a los del buque real, pueden existir variables que desmonten el efecto aportado.

Diversos ensayos fueron llevados a cabo en relación con la aplicación de esta técnica, y como resultado concluyente se obtuvo que la resistencia por fricción se redujo entorno a un 20%, bajo condiciones de inyección de aire óptimas. Además de lo anterior, se comprobó que la inyección de burbujas de aire es más efectiva aguas arriba, en otras palabras, en la zona de proa.

El motivo por el cual presenta un mejor resultado a la zona de proa es porque el Número de Reynolds es inferior a la zona de proa, a diferencia de lo que pasa en la zona de popa, donde debido el Número de Reynolds es mucho más grande, y el comportamiento de las microburbujas en el mencionado entorno es peor.

En la misma línea, Bogdevich en 1.977 comprobó que la inyección de burbujas con índice de vacío mayor daba como resultado una reducción de resistencia también mayor, y su tesis fue comprobada y ampliada por Guin en 1.996, quien observó que la presencia de microburbujas con vacío dentro de la capa límite y cerca de la pared, también resultaba beneficioso.

Tras una mínima conversión del casco del buque, se podrá aplicar esta simple técnica. Es importante remarcar que para este caso es necesario el uso de microburbujas. Para tomar idea del orden de unidades de las microburbujas, observar la tabla con los resultados obtenidos en los indicados ensayos:

Ensayo	Diámetro burbuja [mm]	% aire	Reducción fricción
5 to 15 m/s Moriguchi & Kato (2002)	0,5 y 2,5	> 10%	40%
5 to 15 m/s Shen (2005)	0,0 y 0,5	20%	20%
1 m/s Kawamura (2004)	0,3 y 1,3	--	Mucha más efectiva y persistente debido al tamaño

Tabla 1. Comparación del tamaño de las burbujas según condiciones de ensayo

La base de esta técnica es el uso de microburbujas, ya que lo que se busca es la separación del fluido de la superficie del buque, pero si en vez de esto se provocan más turbulencias mediante el uso de burbujas de grandes dimensiones, lo que se acaba generando es una interacción negativa consecuente al uso de esta técnica.

El mecanismo de funcionamiento no está del todo claro, si bien su aplicación debe ser claramente cercana a la capa límite, ya que ha sido comprobado que su aplicación lejos de la capa límite no tiene ningún efecto sobre la resistencia al avance, puesto que el fenómeno es viscoso, y es en la capa límite dónde se producen los fenómenos viscosos.

Las posibles teorías sobre el porqué del buen funcionamiento de esta técnica son:

- Una interacción positiva de la capa límite, que resulta en una modificación de la turbulencia del flujo y de la densidad del mismo.
- Un aumento de la viscosidad efectiva debido a las microburbujas, y a su vez, causando una reducción de la tensión generada por la viscosidad del agua. Resultando en un cambio del gradiente de velocidades, obteniéndose un perfil de velocidades suavizado.
- Una disminución de la superficie que está en contacto con el agua.

La problemática para establecer el mecanismo de funcionamiento de las microburbujas tiene su origen en la dificultad para determinar cambios empíricos en el flujo y en la turbulencia, debido a que son cualidades y no dimensiones, de las que actualmente no se disponen de medios para tomar mediciones.

No obstante, en 1.998 el profesor Kato, en la Universidad de Tokyo (Japón), llevó a cabo en un túnel de recirculación en un ensayo en el cual una pieza de 580 mm de largo; 120 mm de altura y 50 mm de ancho se sometía a una inyección de aire a través de una placa plana de 40 mm x 40 mm, con tamaño de poros de 15 μm .

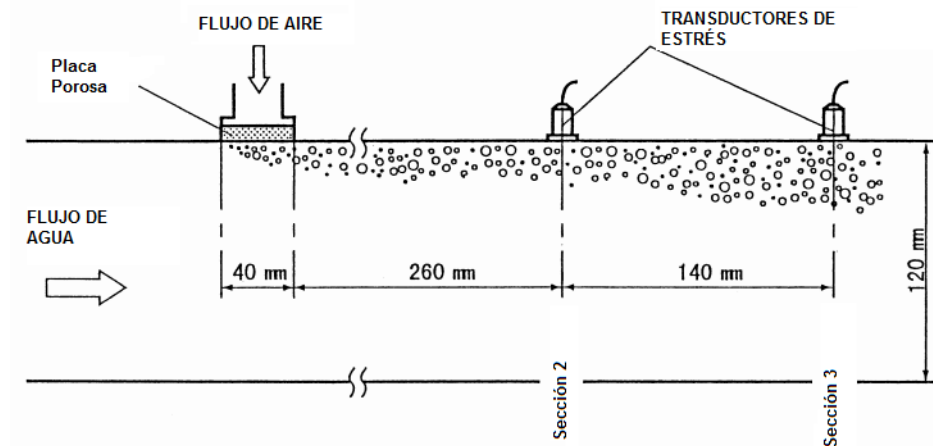


Figura 8. Ubicación transductores

Se usaron dos medidores LDV² (He-N laser, 20mV), para medir la dispersión de las microburbujas y poder analizar el flujo. Sin embargo, no se realizó la inserción de partículas a modo de testigo para poder medir la dispersión y la velocidad del flujo, ya que, con la interferencia realizada por las microburbujas, resultó suficiente.

El fluido usado para el mencionado ensayo viajaba a una velocidad de entre 6 y 10 m/s, situándose con un número de Reynolds de 2 millones, con una velocidad de 8 m/s.

Como resultado preliminar a este ensayo, se obtuvo que para rangos de aire inyectado situados entre 0 y 0,02 no se observó reducción alguna de la resistencia al avance, comprobando que, para rangos de aire superiores, la fricción se reducía de forma considerable.

Seguidamente, se comprobó que, para las mediciones cercanas a la pared del casco, la velocidad se reducía. A modo de valoración, es un hecho interesante ya que el perfil de velocidades es menos abrupto y también lo es en consecuencia la tensión originada por la viscosidad, que es proporcional al perfil de velocidades.

Asimismo, se comprobó que la intensidad de turbulencia se veía disminuida con la aplicación de las microburbujas, no solo en la zona cercana al punto de aplicación, sino que también en las partes más alejadas.

² Del inglés Laser Doppler Velocimetry (LDV), es una técnica usando el efecto Doppler en un destello laser, para medir la velocidad de un fluido transparente o semitransparente, o bien el movimiento vibratorio lineal, en superficies opacas o reflejantes. No necesita de precalibración.

El mecanismo que se interpreta como mitigador de la turbulencia, consiste en la difuminación mediante la interacción de las microburbujas de la turbulencia del fluido, es decir, que a mayor cantidad de microburbujas, mayor será la disipación de la turbulencia del fluido.

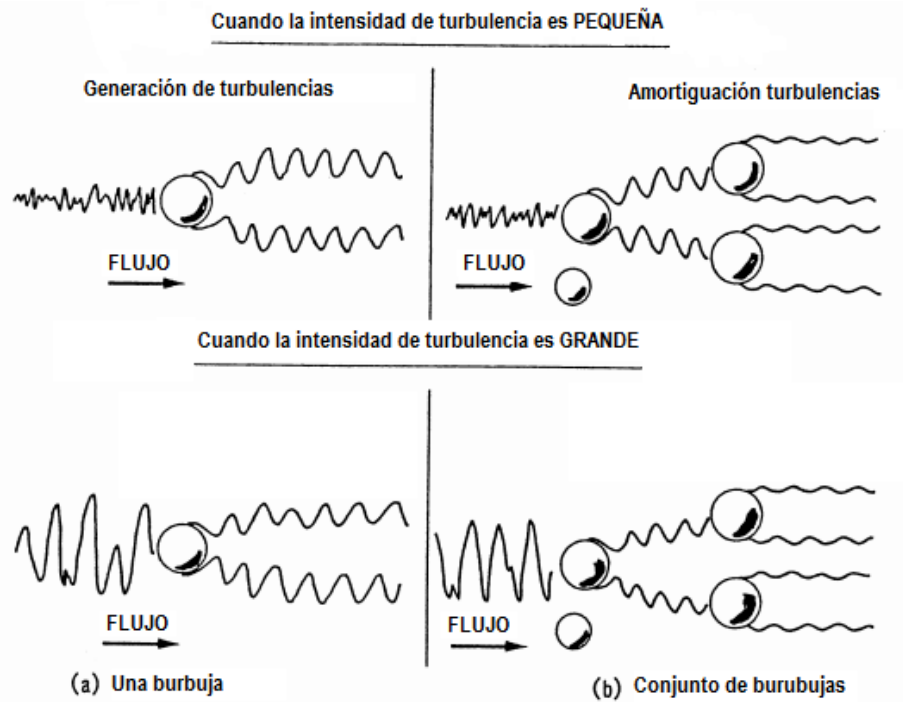


Figura 9. Esquema de los fenómenos a escala

Cabe indicar que se ha realizado la explicación de esta técnica continuamente con la inyección de microburbujas, por lo que entendemos que el tamaño de las burbujas es muy influente en el resultado de la aplicación de esta técnica.

El tamaño de las burbujas aplicadas es independiente del tamaño del poro o del agujero a través del cual se inserta el aire en la capa límite. Lo que determina el diámetro de las burbujas es la velocidad del flujo en que se inyectan y el flujo de aire inyectado.

Investigadores como Tsuji, en 1.984 y como Gore y Crowe en 1.989, estudiaron de forma experimental el efecto del tamaño de la partícula, y llegaron todos a la conclusión que un rango apto para el uso de las microburbujas sería la relación $dp / le \approx 0,1$ (dp : diámetro partícula; le : longitud característica de la turbulencia).

Destacando la importancia de la distribución de las burbujas, y sabiendo de la posibilidad que debido a la flotabilidad de las mismas puedan dispersarse, se realizaron estudios para comprobar la validez de la anterior proposición. Por ello, en la Universidad de Delft, mediante el ensayo de Taylor-Couette³, y llevado a cabo por Van der Berg en 2.005, se comprobó que los ensayos que se realizaron con números de Reynolds alrededor de 1 millón presentaban reducciones en la resistencia. Cabe indicar que, con dicho orden de números de Reynolds deberán considerarse las burbujas inyectadas como deformables.



Figura 10. Ejemplo de ensayo de Taylor-Couette

En este mismo sentido, Kitagawa, en 2.005, comprobó que las burbujas inyectadas se deformaban con una orientación favorable al fluido que le envuelve, generando una reducción de los esfuerzos, siendo el mencionado hecho mayor cuanto más isotrópico⁴ es el flujo que rodea a la burbuja.

Otro de los mecanismos que se proponen para tratar de disminuir la resistencia viscosa, es la aplicación de capas de aire entre el casco y el agua que está en contacto con el mismo. Indicar que la resistencia viscosa es proporcional a la superficie mojada.

En un ensayo realizado por Fukada, en el año 2.000, se comprobó usando una capa de aire, con un grosor de 0,5 mm, sin considerar efectos relacionados con Reynolds, se obtenía una reducción de hasta un 90% de la resistencia al avance.

³ El flujo de Taylor-Couette, consiste en la inserción de un fluido en un espacio entre dos cilindros en contrarrotación, para velocidades angulares bajas, el flujo es estacionario (laminar).

⁴ Independiente de la dirección.

Si bien, y debido a los efectos generados por el fluido con altos números de Reynolds, resulta complicado mantener una capa de aire uniforme y estable. Este hecho puede resultar en un contra efecto de la medida tomada, es decir, puede que la inestabilidad producida por los flujos turbulentos rompa la capa de aire en grandes burbujas, dando lugar a una modificación aun mayor del flujo turbulento, teniendo como resultado final, una alteración del flujo, aumentando de esta forma la resistencia al avance del buque.

No obstante, dada la complejidad de la aplicación de esta técnica, los expertos deberán trabajar juntamente con los fabricantes de pinturas y recubrimientos para el buque para tratar de obtener una solución que permita compatibilizar los flujos turbulentos con la aplicación de capa de aire en la superficie del buque, siendo los fabricantes una parte esencial para obtener recubrimientos hidrofóbicos que ayuden a dar estabilidad a la capa de aire aplicada.

Finamente, la última técnica mencionada que es la aplicación de cavidades de aire en los cascos de los buques (en inglés, ACS – Air Cavity Ships), siendo su uso limitado para superficies horizontales, resultando en una disminución de la superficie mojada local pero que resulta en una considerable reducción de la resistencia al avance.

Si bien, debido al espacio que se genera entre el casco del buque y el agua, teniendo como interfase el aire, se aprecia la generación de superficies libres. Además de lo anterior, durante la navegación del buque en condiciones de escora y cabeceo, el aire contenido en las cavidades del buque puede escaparse, por lo que la implementación de esta técnica puede quedar reducida a los buques de navegación insular o bien en zonas cuya legislación para la emisión de gases contaminantes son muy estrictas.

Es sabido que la resistencia al avance incrementa exponencialmente con un aumento de la velocidad, pero para la aplicación de las cavidades de aire, será necesario altas velocidades para tener un patrón de olas largo en la superficie libre generada en la interfase de las cavidades entre el aire y el agua. O bien, en rangos de velocidades muy pequeñas. Debería estudiarse el mencionado hecho, para que no sea contraproducente su aplicación.

Según las pruebas que se han podido realizar, en ensayos relacionados con el proyecto Till Deymann, se han obtenido reducciones en la resistencia al avance usando la técnica de las cavidades de aire, del orden de entre el 11,5% y el 12,5% para modelos a escala, mientras que, para aplicaciones reales, se han medido reducciones de entre el 8,5% y el 9,5%. Si bien, este orden de magnitudes no incluye las pérdidas relativas a la potencia necesaria para la inyección de aire a través de los compresores, además de la posibilidad de escapes de aire en las cavidades de ACS.

Debe indicarse que, la modificación necesaria para la instalación del sistema de cavidades de aire es mucho más complejo que la inyección de microburbujas de aire, ya que, el sistema ACS, requiere una gran modificación del buque, mientras que la instalación del sistema de aire comprimido afecta mínimamente al casco y se limita a la incorporación de algunos sistemas en el interior del buque.

A todo esto, es importante destacar que cuando usamos la aplicación de aire en el flujo que está en contacto con el buque, siendo su sentido de avance desde proa hasta popa, y sabiendo que este entrará tarde o temprano en contacto con el propulsor del buque, es necesario que su aplicación de aire no exceda la mínima ya que, se debe descartar cualquier posibilidad de que el flujo entregado a la hélice contenga aire.

En el caso que el flujo recibido por el propulsor tenga presencia de aire, aparecerían las pérdidas de empuje, resultando en una reducción importante de la eficiencia de la transmisión de la potencia del motor. Además del motivo anteriormente aportado, la presencia de burbujas o de aire en el flujo absorbido por el propulsor, daña gravemente el mismo y acelera su proceso de degradación, al mismo tiempo, se producen vibraciones en el buque y un aumento de los ruidos. Para evitar que se produzca lo detallado anteriormente, se deberá determinar con exactitud, la cantidad de burbujas insertadas, el lugar y si fuera necesario la instalación de un deflector de burbujas, como se expondrá más adelante.

2.2 Prototipos instalados en barcos

En los anteriores apartados se ha expuesto el principio de funcionamiento y los motivos por los cuales se considera esencial el desarrollo y aplicación de la lubricación del casco por aire, como relatado, los experimentos llevados a cabo no son recientes, por lo que se puede pensar que esta técnica haya podido ser aplicada actualmente en algún buque que a día de hoy se encuentre en servicio.

2.2.1 Till Deymann

Uno de los casos que se puede destacar, es el caso del buque de navegación fluvial “Till Deymann”, con su eslora de 109,8 m es un petrolero alemán que forma parte de la clase “Futura Carriers”, puesto en funcionamiento el 2.007. En concreto el mencionado buque, dispone de la tecnología que se está estudiando en este trabajo.

Su proa, está compuesta a su vez por dos (2) proas uniéndose cual catamarán. Explicado de forma más detallada, su proa, es como si se hubieran juntado dos buques mercantes normales, para formar un único cuerpo en la parte posterior del buque. El objetivo de esta forma es minimizar la resistencia al avance.



Figura 11. Imagen del buque "Till Deymann"

Otro punto interesante del mencionado buque es que se le dispuso un sistema de inyección de aire, para tratar de mitigar los efectos de la resistencia viscosa. La inyección de aire se hace a través de una placa porosa, siendo el tamaño de los poros de 20 μm .

Por todos los puntos anteriormente indicados, el “Till Deymann” es un buque a tener en cuenta, ya que si éste, a modo de experimento tiene un buen resultado, aparecerá un camino para la minimización de las problemáticas expuestas en este mismo trabajo.

Cabe indicar que, durante la fase de diseño, se ensayaron todas las mejoras aplicadas en el mencionado buque. En los ensayos en vez de usar aire comprimido se usó nitrógeno, previamente calentado antes de su inyección. Los ensayos fueron probados a un régimen de 5 a 10 nudos de velocidad, con un caudal de aire desde cero (referencia) y seguidamente a 3 y 6 L/min. Contrariamente a las previsiones y estudios teóricos realizados, la resistencia en según qué condiciones de inyección de aire, resultó en un pequeño aumento de la resistencia al avance.

Aunque se desconocen las causas del mencionado aumento, se procedió con la construcción del buque a escala real, cabe indicar que, el mencionado buque tenía como principal objetivo, el estudio y aplicación de nuevas técnicas que pudieran permitir la reducción de la resistencia al avance. En su fase de prueba a escala 1:1, era importante analizar el comportamiento de las burbujas en entorno salado que no es el mismo que en entorno dulce. Lo mencionado en último punto, es debido al cambio de salinidad tenemos cambios en la densidad del fluido y por ende el comportamiento de las microburbujas.

En el caso de los ensayos a escala real, se utilizaron compresores de aire, y en este caso sí se aplicó aire, en vez de nitrógeno como gas inyectado. Concluyéndose en este caso, y para las condiciones del presente ensayo, que la potencia requerida para el funcionamiento de los compresores de aire era mayor que la potencia que se ahorraba durante la aplicación de la lubricación por aire.

Aunque los resultados de los experimentos no fuera el esperado, en el año 2.007, año de construcción del mismo, se le otorgó el premio al buque menos contaminante, un hito conseguido sin haber logrado tener un resultado positivo de las técnicas aplicadas.

Otro intento de aplicación de la técnica que ocupa al presente trabajo fue la implantación de la misma en un buque RO-RO de alta velocidad, cuyas dimensiones principales eran, eslora de 187,- m, manga de 25,- m y un calado de 7,5 m. Las microburbujas de aire debían ser inyectadas desde el bulbo de la proa, sito la presión estática es mínima, a causa de la alta velocidad localizada. Estimándose la presión en el mencionado punto del buque en 0,14 MPa.

Se realizaron varios test a varios caudales de aire, a un modelo a escala, lográndose una reducción de alrededor de un 10% de la resistencia viscosa, a un caudal de aire de 500 m³/min, resultando en una reducción global del 4%, debido a la alta resistencia por formación de olas.

Si bien, los resultados presentados en el anterior experimento no destacaron por su optimismo, otros ensayos en los cuales la aplicación del gas era hidrogeno, se percataron que para obtener una reducción en la resistencia similar a la anterior, el caudal de gas necesario era muy inferior. Se desconoce el motivo por el cual el hidrógeno es más efectivo que el aire.

Además de todos los buques anteriormente expuestos, los cuales pertenecen a una clase de buques más experimentales, a continuación, se aportarán buques pertenecientes a navieras de primer orden que ya tienen instalados en sus instalaciones el sistema de inyección de microburbujas de aire.

2.2.2 M/S Harmony of the Seas

Otro de los buques que puede ser destacado, no solo por la instalación de la técnica comentada en el presente trabajo, sino que, además se trata de un buque de primera orden, es decir, un buque insignia de la naviera “Royal Caribbean” perteneciente a la clase “Oasis” que engloba a buques de pasaje con una capacidad de transporte de hasta 220.000 TRB (Toneladas de registro bruto) y capaz de albergar hasta 5.400 pasajeros. La presente, le pertenecen los buques de pasaje más grandes del mundo.

El buque “Harmony of the Seas” es reconocido como el buque de pasaje más grande del mundo con 362 metros de eslora; 47 metros de manga y 22,60 metros de puntal, con un total de dieciocho cubiertas de pasaje. Y una potencia a la propulsión instalada de 5,50 MW.



Figura 12. M/S Harmony of the Seas

A nivel ecológico, este tipo de buques son considerados nocivos, ya que, para cubrir las necesidades demandadas por la totalidad de los pasajeros que transporta es necesaria la instalación de grandes generadores eléctricos, además de plantas especializadas de tratamiento de residuos. Por todo lo expuesto anteriormente, los cruceros, son buques que tienen un gran impacto con el medioambiente. Sin embargo, debido a la concienciación que del maltrato del medioambiente y a las directrices internacionales dictadas para el control de la contaminación, la mencionada naviera, se ha conjugado con astilleros, fabricantes y oficinas técnicas para desarrollar tecnologías para reducir este impacto.

El mencionado buque que está dotado por motores de la marca Wärtsilä, motores de última generación y con índices de contaminación reducidos, teniendo en cuenta su potencia. Además, la mencionada firma fabricante de motores, dispone de sistemas de “limpieza” de los gases causados por la quema de combustible procedente de los motores los motores de combustión interna, que accionan los sistemas de propulsión y generadores de electricidad a bordo, conocidos como Scrubbers⁵. No siendo todas las anteriormente expuestas medidas suficientes para reducir su impacto, la naviera Royal Caribbean, tomó la decisión de instalar en el mayor buque de pasaje construido hasta la fecha, sistemas de inyección de microburbujas de aire en la capa limite, con el fin de disminuir el consumo de combustible.

Según datos aportados por los armadores del “Harmony of the seas” el buque presenta reducciones de hasta el 20% de combustible cuando los antedichos sistemas de inyección de microburbujas están en funcionamiento. Pudiéndose comprobar la efectividad de dicho sistema por primera vez en un buque de grandes dimensiones.

Los resultados de esta prueba piloto han sido sumamente convincentes para los propietarios del buque, que han decidido instalar dichos sistemas en los próximos buques que en fechas próximas serán botados por la naviera Royal Caribbean.

⁵ Dispositivo para tratar el aire de la postcombustión, eliminando partículas, conocido generalmente como depurador.

2.2.3 Astilleros y oficinas técnicas

Se ha comentado con anterioridad que se han juntado oficinas técnicas, astilleros, fabricantes de motores y accesorios marinos, para desarrollar la técnica que ocupa al presente trabajo. Ejemplos de ello son el astillero francés Bénéteau, y la firma fabricante de motores y de equipamiento marino Mitsubishi.

2.2.3.1 Air Step® de Bénéteau

El astillero francés Bénéteau, desarrolla la tecnología Air Step® producto de un ambicioso programa de desarrollo al objeto de desarrollar cascos de nueva generación.

La antedicha tecnología, consta de cascos con pequeños escalones en los cuales se liberan hilos de aire combinados con agua, lo que permite reducir las superficies de contacto y añadir cierta velocidad, es decir, se desarrolla como un medio de reducción del consumo de aire, siendo a su vez un medio propulsivo. Dicha tecnología fue desarrollada en el año 2.003.

Existe una segunda generación de Air-Step®, desarrollado por la misma firma Bénéteau, la cual tiene un caudal superior de aire introducido en el casco, que combinados con equipos de propulsión IPS de la firma fabricante de motores Volvo, permiten la obtención de embarcaciones de hasta 46 pies altamente eficientes.

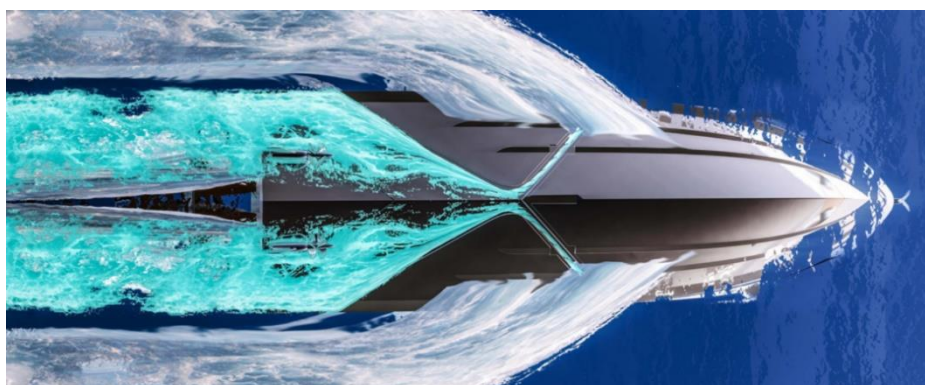


Figura 13. Diagrama de funcionamiento del dispositivo Air-Step®

Se puede observar que la firma Bénéteau, ha hecho un paso más allá de lo que hasta el momento se había aportado en este trabajo, que es la simple aplicación de burbujas de aire en el casco. La mencionada firma, tras horas de pruebas e investigación ha dado con un híbrido entre la inyección de microburbujas y una nueva forma de propulsión. Entendiendo que se usan las propias burbujas de aire inyectadas como medio propulsivo, ya que estas se mezclan con el flujo

de agua junto la cual es insertada, por este motivo se usan las microburbujas como lubricador y propulsor. Entendiéndose dicha afirmación que las burbujas junto con el flujo de agua con el que viajan actúan de Aquajet.

Como norma general, se establece que la fuente propulsiva de la embarcación deberá hallarse en la popa, pero esta técnica aplica propulsión a lo largo de la eslora, modificando a su vez el casco de forma que permita una mejor efectividad de la mencionada técnica. Todo ello, comporta una reducción de la potencia necesaria a ser instalada en el buque, lo que hace que se reduzca la contaminación y se procure por la economía del propietario de la embarcación.

2.2.3.2 MALS (*Mitsubishi Air Lubrication System*)

En segundo lugar y atribuido a un segmento de mercado diferenciado al anterior, la marca Mitsubishi ha desarrollado su propio sistema para la aplicación de microburbujas de aire en la capa límite de las embarcaciones.

Bajo el nombre de MALS (siglas en inglés de Mitsubishi Air Lubrication System) se halla una de las prematuras tecnologías de aplicación de microburbujas de aire que se ofrecen.

Su objetivo, es crear bajo el casco del buque una fina capa compuesta por pequeñas burbujas de aire, a través de un compresor, para separar la resistencia producida por el contacto del agua de mar con el casco el buque mientras el buque se halla en navegación.

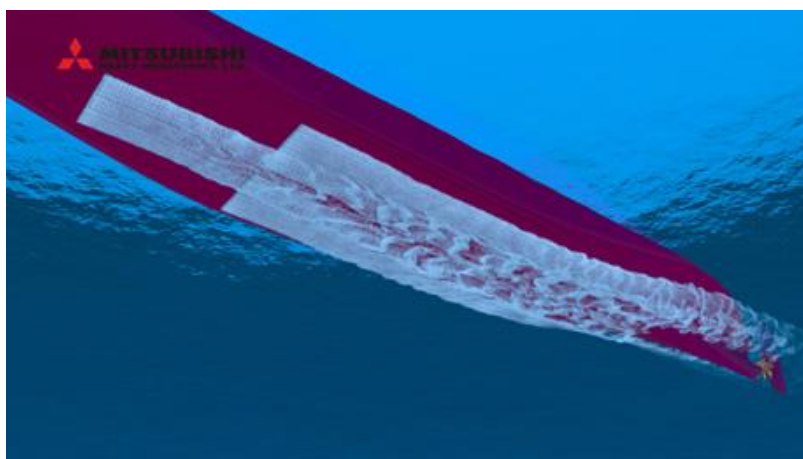


Figura 14. Esquema de funcionamiento del sistema MALS

Sobre la base de la información facilitada vía el portal web de Mitsubishi, su tecnología ha sido requerida para ser instalada en buques graneleros, de pasaje y de carga general. Ofreciendo

reducciones de hasta el 35% de las emisiones de gases contaminantes como el CO₂ en comparación a buques que no dispongan del sistema MALS instalado.

Para poder desarrollar esta técnica, la firma Mitsubishi, monta en los buques deseados los equipos que subministrarían de aire a la capa límite mediante unas salidas, cuya colocación es determinada mediante el uso de programas de elementos finitos y de estudio de la dinámica de fluidos, con el fin de obtener un resultado lo más óptimo para la mayoría de circunstancias de navegación.

Del mismo modo que comentado con el caso de buque “Harmony of the Seas”, el objetivo del sistema MALS, es generar una fina capa compuesta por pequeñas burbujas de aire, con el fin de reducir la resistencia generada por la fricción del agua con el casco del buque.

Ejemplos de aplicación del sistema MALS, es el buque “Yamatai”, un buque de transporte de mercancías de dimensiones especiales, cuyo casco es semi-sumergible. Dicho buque de dimensiones 162,- metros de eslora; 38,- metros de manga- y 6.50 metros de calado, operado por una de las filiales de la naviera NYK, fue usado como buque de prueba para la instalación del mencionado sistema.

El motivo por el cual fue escogido el mencionado buque, es porque debido a la tipología de buque, sus formas son simples con un fondo plano y presentando un calado pequeño, lo que permite trabajar con presiones más reducidas, lo que permite tener equipos de menor envergadura y un menor consumo de los equipos instalados.



Figura 15. M/S Yamatai

Según datos obtenidos por la experimentación en el antedicho buque, se observaron reducciones en la emisión de gases contaminantes de alrededor del 10%, lo que hizo plantearse a los diseñadores una nueva aplicación del sistema MALS.

De los anteriormente expuestos buenos resultados, se está trabajando con el desarrollo de un gran nuevo proyecto, que es la construcción de un nuevo buque tipo portacontenedores Nuevo Panamax de 14.000 TEU, con la instalación del sistema MALS para tener una clase de portacontenedores energéticamente eficientes, bautizado como “MALS-14000CS”.

Cabe indicar que no es muy extensa la lista de buques que disponen de la inyección de microburbujas de aire, ya que es un aspecto reciente, que se ha probado en canales de ensayo y no hay muchos testimonios de buques que se hayan montado dichos sistemas, pero poco a poco y con los resultados de algunos de los buques mostrados en este apartado, el interés de aplicación de esta técnica cada vez es mayor.

Además, y al tratarse de una técnica reciente y en muchos aspectos desconocida, las firmas fabricantes o distribuidoras de los equipos, no es fácil encontrar información detallada de los equipos por miedo al plagio y/o competencia.

2.2.4 Nuevos horizontes

Otra de las técnicas que se aplican para tratar de disminuir la contaminación son las cavidades de aire, que tienen la misma idea de funcionamiento, separar la superficie del casco del buque mediante una interficie de aire, al flujo envolvente.

Es una técnica más complicada, ya que es costoso mantener dicha cavidad en según que circunstancias de navegación, quedándose limitado su uso en algunos tipos de buques, en función de su zona de navegación habitual. Asimismo, se necesita que el casco tenga formas de cavidades que le permitan almacenar el mencionado aire, por lo que instalar este tipo de técnicas en buques existentes, queda mayoritariamente descartado.

En el mismo sentido que lo planteado para la firma Mitsubishi, la naviera AIDA Cruises, ha planteado que en los próximos buques que se boten, se optará para instalar en su interior un sistema de inyección de microburbujas de aire, para tratar de obtener buques más respetuosos con el medioambiente.

La naviera Stena, se está planteando nuevas técnicas para aplicar a su flota para tratar de disminuir la emisión de gases contaminantes y al mismo tiempo reducir el consumo de combustible. Una de las técnicas propuestas es la disposición de cavidades de aire en el casco de los buques de su propiedad.



Figura 16. Propuesta de la naviera Stena de construcción de cavidades de aire

Como se puede comprobar la superficie de casco que no está en contacto con el aire es muy grande, siendo el ahorro proporcional a la superficie del casco que no está en contacto con el agua. Además, se observa que se disponen de rompeolas, porque al tener tal cantidad de superficie libre, se pueden generar olas que pueden ser contraproducentes a la aplicación de la presente técnica.

3. Análisis del diseño de un sistema de lubricación por aire

A lo largo del trabajo se han ido exponiendo posibles ventajas del uso de la lubricación por aire en los buques, la principal es su efecto positivo sobre la reducción de la resistencia de avance de las embarcaciones, pero otra perspectiva no comentada hasta el momento es su versatilidad, es decir, que puede ser implementada en cualquier tipo de artefacto marino.

Se ha elegido el uso del sistema de inyección de microburbujas, debido a la simplicidad de diseño e instalación como podrá ser comprobado a continuación, y a los resultados mostrados en anteriores apartados, augurando un futuro positivo a dicha técnica.

Actualmente la flota mundial se sitúa en aproximadamente 90.000 buques⁶ en navegación, que como comentado en apartados anteriores, su contaminación está haciendo mella en el medioambiente y en la economía del sector naval por su alto consumo de carburantes. Habiéndose, comprobado que la instalación de equipos simples, conjugado con un correcto uso, puede resultar en una disminución, hasta el momento pequeña, pero esperanzadora, para un sector que se halla en continua búsqueda de soluciones para problemas que llevan siglos enquistados.

Si bien es verdad, que técnicas como las cavidades de aire, requiere de una modificación de las formas del casco, la implementación de técnicas como la inyección de microburbujas, a groso modo, consiste en agujerear el casco, obtener un flujo de aire correcto y dotar de equipos que permitan la aplicación de esta técnica.

⁶ Datos de principios de 2.015.

3.1 Instalación genérica

En este apartado se detallarán de forma genérica, los equipos necesarios y la instalación básica, que podría permitir a todos los buques de la flota mundial aplicar estas técnicas.

Dichos equipos quedaran englobados en el sistema de aire comprimido, partiendo de la base de algunos de los sistemas ya instalados a bordo como el subsistema de arranque o el subsistema del tifón⁷.

A continuación, se proceden a detallar los elementos que conforman el sistema para inyección de microburbujas de aire:

1. Grupo compresor
2. Filtro de aire
3. Refrigerador y secador de aire
4. Válvula(s) antirretorno
5. Acumulador de aire
6. Válvula de seguridad
7. Purgador manual
8. Manómetro(s)
9. Reguladores
10. Lubricador / Desengrasador
11. Tubería(s) fijas rígidas
12. Tubería(s) desmontable(s) rígidas
13. Tubería(s) de sistema alimentación principal
14. Panel de control
15. Conductos de agua de refrigeración entrada y salida
16. Ventilación para la sala de máquinas.

⁷ Coloquialmente bautizado como “sirena” o “bocina”.

3.1.1 Equipos de compresión

Como es sabido, durante el proceso de compresión de aire, se generan elevadas temperaturas, además de depresiones en el lugar donde se albergan los equipos de compresión, por lo que será necesario disponer de la zona de equipos de ventilación forzados o naturales. Es importante que se dispongan filtros secantes para proporcionar aire seco y limpio.

No solo es importante describir los equipos necesarios para la aplicación de la presente técnica, sino que será necesario al mismo tiempo tener un adecuado mantenimiento. Para ello, se partirá de inspecciones visuales de los equipos instalados de forma asidua e inspecciones puntuales en zonas que no se hallan a la vista y que pueden ser susceptibles de fallar.

De una forma periódica, se deberán realizar test, a una presión de 1,5 veces la presión de diseño, para comprobar que todos los equipos de seguridad dispuestos funcionan de una forma óptima y poder comprobar que no hubiera pérdidas difícilmente detectables al ojo humano. Asimismo, un mantenimiento básico de engrase de las piezas con desgaste mecánico, comprobando que la sustancia engrasante se encuentra libre de partículas que puedan ser un signo de desgaste mecánico.

Debido a la necesidad de lubricación de las partes móviles de los compresores, dispondrán de aceites lubricadores que de forma puntual pueden contaminar el aire comprimido, para ello, será necesario de forma periódica realizar comprobaciones con tal que la presencia de aceite en el aire no se sitúe en valores demasiado elevados.

Otro aspecto básico para el correcto funcionamiento de la instalación será comprobar el estado de las válvulas, ya sea, cierre, apertura, estanqueidad, equipos de control, mecanismo de accionamiento, etc. Agrupando los manómetros, filtros y reguladores de presión, en el mismo grupo, en orden de importancia, y de la misma forma, comprobando su correcto funcionamiento, y remplazándolos en caso de necesidad.

3.1.2 Equipos de tratamiento del aire comprimido

Para el correcto funcionamiento de los equipos de compresión, será necesario de la instalación de equipos y mecanismos. No solo serán necesarios para la producción de aire comprimido, sino también será necesarios para su distribución y posterior uso.

A menudo se usa el término “Unidades FRL”, que incluyen de una forma unitaria las unidades referentes al filtraje, regulación, lubricación / desengrase, teniendo como objetivo de entregar el aire a los consumidores con la mejor calidad, en el caso que trata el presente trabajo, las cajas de microporos.

Las mencionadas unidades permiten conectar el filtro, el regulador y el lubricador de una forma simple y rápida. Es habitual que estas unidades FRL, se presenten montadas sobre soportes de sujeción rápida y para fijarse sobre tuberías rígidas.

De forma separada y en profundidad se procederá a detallar la importancia de cada una de las subunidades que se agrupan en las unidades FRL.

- Filtros de aire: Como misión básica, los filtros deberán separar y acumular los contaminantes de las posibles partículas sólidas más grandes y atrapar el aceite de lubricación usado para el correcto funcionamiento del compresor, para poder volver a ser usado en un nuevo ciclo de lubricación.

Para el presente caso, que es la aplicación de microburbujas en el interior de la capa límite del flujo alrededor del casco del buque, será muy necesario la obtención de un aire lo más puro y limpio posible para poder ser introducido en el mencionado flujo.

Es importante que ninguna partícula que no sea aire pueda ser distribuida hasta las cajas de microporos, ya que estas podrían quedar obstruidas, o en caso contrario, se podrían inyectar en el interior de las microburbujas, partículas que pudieran perjudicar la interacción positiva de las microburbujas con el flujo que rodea al casco.

- Regulador de aire: Permite de forma manual o bien automatizada, seleccionar la cantidad de aire o presión que se va a entregar a los consumidores del descrito sistema.

No obstante, en el caso que se trata, puede ser altamente complicado determinar a qué presión se trabajará habitualmente en la inyección de microburbujas de aire, si bien este podrá ser determinado en base a la experiencia.

- Lubricador / Desengrasador: Esta parte es la menos influyente en nuestro sistema, pero necesaria para el correcto funcionamiento, si bien es verdad que es importante no proveer de grandes cantidades de lubricación, ya que en fases posteriores será más complicada su recuperación y por ende, la obtención de un aire suficientemente seco y limpio.

3.1.3 Depósito acumulador

Los sistemas neumáticos, de forma general, suelen incluir a parte de un depósito principal, varios depósitos auxiliares, para cada una de las ramas de alimentación de aire.

La capacidad de los depósitos acumuladores vendrá marcada por las necesidades de nuestra instalación, que a su vez vendrá directamente ligada con la dimensión principal de nuestra embarcación, es decir la eslora. A más eslora, mayor deberá ser el depósito principal que se deberá instalar para abastecer de forma continua al casco de la lubricación por aire.

La instalación del depósito acumulador se basa en la necesidad de tener un servicio continuo y regular de aire comprimido, sin tener que depender de posibles alteraciones en el funcionamiento del compresor, ya sea por avería del mismo o bien, por disfunciones, pudiendo afectar a la calidad del aire insertado.

3.1.4 Válvulas de seguridad

Elemento básico de la seguridad en la operación con cualquier sustancia fluida (líquida o gaseosa). En la fase de diseño, y como comentado anteriormente, en función de las necesidades de cada buque, se establecerá una presión de trabajo adecuada para cada caso, por lo que en cada caso se deberá seleccionar la presión de actuación de la válvula de seguridad.

A modo de aportación generalista, las presiones habituales de timbrado de las válvulas de seguridad se suelen situar en una presión 1,5 veces la presión de trabajo.

3.1.5 Tuberías

Ante el elemento del sistema más cuantioso, como son las tuberías, y como diseñador se pueden tomar dos decisiones, que serán tomadas a criterio del mismo, y a su vez, por las características que presenta el buque. Las opciones que se presentan son la instalación de los equipos necesarios para la lubricación del casco por aire a la zona de proa, cerca del punto de inyección (si el espacio y disposición del buque lo permite) o bien su instalación en la zona de popa (en sala de máquinas, realizándose la pertinente disposición de tuberías a lo largo del buque hasta el punto de inserción).

Para la selección del material idóneo para la circulación de aire comprimido en su interior, podría parecer en primer lugar una decisión fácil y sin mucha complicación, pudiendo elegir entre todas las posibilidades que ofrece el mercado, como tuberías de policloruro de vinilo (comúnmente conocido como PVC), tuberías metálicas (de acero, de aluminio u aleaciones) o tuberías de goma rígida.

Es importante destacar que el aire no es una sustancia que pueda ser considerada como peligrosa, en términos químicos, pero si debe ser considerado como un agente abrasivo, ya que la humedad que contiene en interior puede dañar las tuberías metálicas, desarrollando de esta forma un proceso de deterioración acelerado, por la oxidación que se pueda derivar del anterior hecho.

Una de las mejores opciones es escoger las tuberías de PVC, en concreto la marca patentada y específica para la distribución de aire comprimido, Air-Pro®, ofreciendo muy pocas pérdidas por fricción, permitiendo uniones por termofusiones, con una excelente resistencia química a altas presiones y a roedores y bacterias.

La otra opción comentada y que puede ser considerada como una buena elección son las tuberías de caucho reforzado con malla metálica que, aunque no tiene una buena resistencia ante los agentes químicos, tiene una buena respuesta ante la abrasión, que es lo que interesa por las características del fluido usado.

Finalmente, cabe indicar que en el caso que se usaran otro tipo de fluidos, ya sea nitrógeno o bien cualquier otro tipo de fluido efectivo para la reducción de la resistencia al avance, sería necesario el estudio en profundidad del fluido en cuestión y de qué materiales serían más compatibles.

Además de todo lo anterior, materiales como el PVC, permiten hacer conexiones de tuberías de una forma más fácil y cómoda. Asimismo, permite realizar cualquier tipo de disposición de tuberías debido a la forma de construcción y montaje, no siendo necesario el uso de soldaduras.

3.2 Instalación específica

A continuación, se detallarán elementos que son exclusivos del sistema que se está tratando.

3.2.1 Punto de inyección

Hasta el momento se ha detallado, la instalación de los equipos de aire comprimido y todos los equipos complementarios, pero para el uso del sistema de inyección de aire, será necesario instalar la zona de inserción de las microburbujas de aire comprimido, realizándose los pertinentes agujeros en las zonas de proa.

A continuación, se procederá a detallar como se presenta la caja porosa, a través de la cual, y mediante la aplicación de aire comprimido, se generarán las microburbujas que como comentado anteriormente ayudarán a reducir de forma evidente la resistencia de origen viscoso.

Las burbujas se generarán a través de la compresión de aire producido en el interior compresor dispuesto en el buque, habiéndose determinado según experimentación la presión a la que deberán trabajar los compresores para obtener las deseadas microburbujas. Desde los equipos de generación el aire comprimido deberá viajar hasta el punto de inserción, generalmente situado a proa o bien, a proa y a una zona intermedia de la eslora, a través de las tuberías dispuestas expresamente para el sistema de inyección de aire.

Llegados al punto complicado en todo buque, que es la realización de un agujero en el casco, por debajo de la línea de flotación, se debe comparar con agujeros que habitualmente se instalan en los buques como son las tomas de refrigeración, o bien las cajas de mar para buques de mayor envergadura.

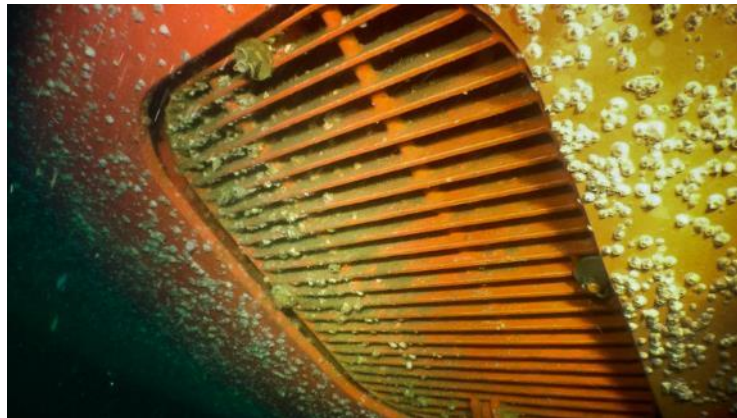


Figura 17. Ejemplo de una caja de mar

Para buques de menor tamaño, solamente se realiza un agujero en el casco a través del cual se le instala el elemento que se muestra a continuación.



Figura 18. Ejemplo de una toma de mar de un barco de dimensiones inferiores

La base de la aplicación de las burbujas deberá usar las características destacadas anteriormente de las cajas de mar, para poder aplicar las burbujas a lo largo del flujo que recorre a lo largo del casco del artefacto marítimo.

El principal problema que se puede hallar en el uso inverso de las tomas de mar es que, si en el lugar de la tubería a través de la cual se tomaría el agua para el uso que fuera necesario, ya sea refrigeración, achique o cualquier otra aplicación, se usara para introducir aire en las tomas de mar, se generarían grandes burbujas que recorrerían a lo largo del casco, lo que sería perjudicial para la aplicación de la presente técnica, ya que como comentado en apartados anteriores, se tiene la necesidad de usar burbujas de pequeños diámetros.

3. Análisis del diseño de un sistema de lubricación por aire

Con el fin de solucionar el problema del tamaño de las burbujas introducidas, se deberá instalar, en el momento previo que el aire comprimido entre en contacto con el agua, una membrana impermeable⁸ o bien una placa con poros de un reducido tamaño, siendo habitual un diámetro de aproximadamente 20µm. Finalmente, se podría usar una variante de una opción usada en el entorno médico y de laboratorio, que es usar ondas de ultrasonido de alta frecuencia aplicadas en el aire comprimido que se aplique al agua, generando dichas ondas el mismo efecto que si de una válvula de apertura y cierre se tratara, debido a las ondas de choque que se producen en el aire, que tras ponerse en contacto con el agua se generarán las mencionadas microburbujas que nos interesan.

Cabe indicar que todas las opciones mencionadas anteriormente son aptas para el fin que se quiere obtener, por lo que su elección vendrá dada en función de las necesidades económicas o bien, a la predisposición de elección de un método u otro.

Desde el punto de vista de inconvenientes, tanto económicos como técnicos, la instalación de esta idea no es muy problemática, ya que como se ha comentado hasta el momento, la instalación de esta técnica no requiere de materiales / elementos muy caros, ni de grandes modificaciones desde el punto de vista de maquinaria.

⁸ Las membranas impermeables, son membranas que impiden el paso del agua pero permiten la transpiración o la circulación de aire hacia el sentido contrario que se impide el paso de agua. El proceso para la transpiración requiere de tres fases, primeramente la absorción del vapor de aire por parte de la membrana, la molécula avanzará hacia el lado que tenga menos presión, por lo que será necesario una acumulación de gases por el lado contrario al que se quiera mover. Tras la presión ejercida por los gases, la molécula traspasa la membrana y finalmente se libera de la misma.

3.3 Consideraciones de diseño

A modo de diseñador, se presentan dos alternativas, para buques ya construidos que quieran integrar el sistema de inyección de aire en la capa límite, siendo la primera opción la de mantener el sistema de aire comprimido aislado del sistema general de servicio de aire comprimido (para arranque del motor, servicios acústicos, accionamiento de válvulas neumáticas, etc); o bien, la segunda opción sería sobredimensionar el sistema ya existente, y colgar del nuevo la antedicha aplicación.

Como principal ventaja de añadir un sistema paralelo de aire comprimido al original es que en caso de algún mal funcionamiento del sistema de inyección de aire, el servicio de aire comprimido general de a bordo seguiría operativo, por lo que este tipo de configuración se podría definir como una instalación segura, es decir duplicar las instalaciones para mantener los servicios básicos para la navegación operativos.

En cambio, la amplificación del sistema original de servicio de aire comprimido a bordo, es una opción más económica que la anterior, ya que requiere menos costes de material, menos consumo de energía para el accionamiento de los compresores y menos piezas de recambio. Cualquier avería en el sistema de inyección de aire comprimido, entendido este último como un equipo no básico para la navegación, podría afectar a los equipos de básicos para la navegación.

Cabe indicar que el uso de equipamientos duplicados puede suponer una reducción del espacio de la sala de máquinas, espacios ya de por sí bastante limitados. Como alternativa, e imitando servicios como los de amarre y fondeo, estos equipos podrían deslocalizarse de la sala de máquinas.

Se observa que no existe una regla general para todos los buques, ya que cada uno de ellos tiene una configuración única, por lo que cada solución deberá adaptarse a las necesidades demandadas. Sin embargo, sí que podrían establecerse soluciones para cada tipología de buque. Y como es sabido la configuración de una sala de máquinas de un buque de recreo no es la misma que la configuración de la sala de máquinas de un buque mercante, por lo que no se puede hablar de paralelismos en sus instalaciones.

3.4 Tipología de buques

Se ha comentado a lo largo del presente Trabajo que no existe una formula aplicable para todos los buques de la flota mundial, que cada uno de los casos deberá ser estudiado en función de sus características. Uno de los puntos que se deberá tener en consideración en el momento que se decida instalar este dispositivo, será la forma del buque.

Debido al fin para que se destina la embarcación, esta tomara una forma de casco u otra, es decir, si es un buque de carga, se tendrán mayores valores del Coeficiente de Bloque (CB), lo que implica formas más cuadradas, con costados rectos y, sobre todo una superficie plana en la parte inferior del casco. Estas formas de casco se denominan formas en “U”. Este tipo de formas tienen más facilidad a instalar el sistema.

Otro tipo de embarcaciones, son las embarcaciones rápidas, y buques de pesca, entre otros que tienen cascos que la forma del mismo se denomina como casco en “V”.

Debido a la densidad de las burbujas de aire introducidas en la capa límite comparada con la del agua, las burbujas tienden a ascender por lo que no se mantienen en el lugar que es de interés y que permite la deseada reducción de la resistencia de origen viscoso. Por ello, los cascos en forma de “V” en muchas ocasiones y salvo una modificación que permita mantener las mencionadas burbujas pegadas a la superficie del casco, no se contempla la aplicación de la mencionada técnica, para este tipo de embarcaciones.

Generalmente, su aplicación es mayoritaria en los buques con casco en forma de “U”, aunque no única. Si bien, no solamente es importante el uso de este tipo de cascos, sino que también se deberá habilitar o modificar el casco en ciertas áreas para que la inyección de las microburbujas resulte más eficiente. Para ello se dotará de canalizadores de agua, difusores o canales a para guiar el flujo de la forma deseada.

Es importante notar que el flujo de aire deberá ser calculado de tal forma que sea eficiente pero que en ningún caso este flujo pueda llegar al propulsor ya que, si esto tuviera lugar, se producirían pérdidas de empuje y se podrían causar daños en el mismo. Del anterior hecho se deriva la necesidad de instalar dispersores de flujo.

Asimismo, hacer hincapié en el punto de aplicación de las microburbujas es importante ya que, si estas son insertadas de forma directa, al entrar en contacto con el flujo a alta velocidad que se encuentra este circulando alrededor del buque, podría tener un efecto negativo para nuestros intereses, resultando en una mala aplicación de la técnica. En otras palabras, se acabaría obteniendo una mayor turbulencia del flujo que rodea el casco. Por todo ello, la aplicación del flujo deberá ser lo más suavizada y progresiva posible para tratar de evitar cualquier formación brusca. Sin embargo, para determinar la mejor forma de inyección para el fluido debería usarse programas para el análisis de fluido.

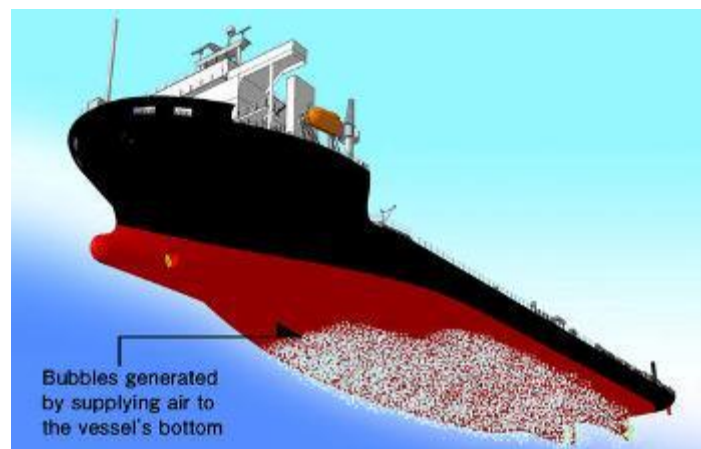


Figura 19. Ejemplo de aplicación

4. Diseño de un sistema de lubricación por aire para un buque real

Habiendo introducido anteriormente todos los puntos necesarios para tener una instalación de lubricación por aire plenamente operativa, se podría plantear el caso de un buque real, que durante las revisiones obligatorias, se le quiere instalar un sistema de lubricación por aire.

Puesto el ejemplo de un buque portacontenedores tal como el Emma Maersk, de dimensiones 397 metros de eslora, 56 metros de manga y un puntal de 30 metros, con una capacidad de transporte de aproximadamente 15.000 TEU⁹, botado en el año 2.006, como parte de una generación de buques conocidos como los triple “E”, bajo el lema de *Economy of Scale Energy efficient and Enviromentally improved* (en español Economía de escala, eficiente energéticamente y avanzado con el medioambiente).



Figura 20. M/S Emma Maersk

Los propietarios del buque establecieron este lema como pilar para el futuro desarrollo de los buques que formaran parte de la compañía naviera, para ello, los buques que formaban parte de esta clase eran muy buenos desde el punto de vista de eficiencia energética y eficiencia con el

⁹ TEU (Twenty-foot Equivalent Unit), es una unidad de carga inexacta usada para clasificar a los contendedores cuya longitud se sitúa en 20 pies (6,1 metros) estableciéndose esta medida como estándar.

medio ambiente, ya que se obtuvieron formas hidrodinámicamente muy efectivas y motores que combinados con sistemas auxiliares presentaban una reducida emisión de gases contaminantes. Que para entonces se convirtieron en los buques más grandes del mundo y a su vez los que menos impacto medioambiental generaban.

Tomando el mencionado buque como ejemplo para la instalación del sistema que se está tratando a lo largo del presente trabajo, con el objetivo de alcanzar una aun mayor eficiencia energética para esta clase de buques.

4.1 Consideraciones previas

En el supuesto que se fuera requerida la intervención del buque, en primer lugar y con los planos detallados del mismo, se debería determinar en qué lugar se ubicaran los equipos que alimentaran a la capa límite de microburbujas.

En el caso que actualmente se está desarrollando, el Emma Maersk, tiene localizada la Superestructura a 1/4 de la eslora, estableciéndose la Sala de máquinas en la zona de popa habitual, siendo los antedichos hechos característico del buque. A consecuencia de su eslora, se deberá disponer mínimo dos (2) puntos de aplicación de aire para garantizar su efecto a lo largo de la eslora y al mismo tiempo asegurar que las burbujas no llegarán a la zona del propulsor.

Seguidamente, se deberá decidir en qué punto del buque se instalarían los equipos compresores, es decir, si aprovechar la ubicación de la super estructura, o bien aprovechar la zona del castillo de proa, o como tercera opción, localizar los mencionados equipos en la zona de la Sala de máquinas. Tomando como referencia otros buques que se les ha instalado el sistema MALS (Mitsubishi Air Lubrication System), en los que se observa que estos están instalados a la zona del castillo de proa, siendo la opción más lógica, ya que se dispone de subministro eléctrico para equipamientos tales como los molinetes y cabrestantes. Además de un lugar físico en el cual ubicar maquinaria relativamente cerca del lugar de inyección de las microburbujas.

4.2 Especificaciones del proyecto

Para la disposición de las tuberías, se podría usar los pasamamparos y lugares por donde pasan las tuberías ya instaladas, con el fin de agilizar y no tener que realizar operaciones complicadas para su la instalación.

La elección de elementos y partes para la aplicación de la presente técnica que se detallan a continuación.

4.2.1 Tuberías y accesorios para su instalación:

De la firma Asahi/America, y del rango de productos Air-Pro®, se escogería del modelo RD7, con una presión máxima de trabajo de 230psi (15bar), y con diámetros disponibles desde 20 a 110 mm, siendo la elección del diámetro directamente ligada con el caudal de aire requerido, pero situando su elección en torno a 40 y 60 mm.



Figura 21. Accesorios y tuberías Air-Pro®

Como comentado anteriormente, la elección de estas tuberías de PVC, viene determinada por respetuosidad con el medio ambiente, debido a los materiales con los que está construido, por su buen comportamiento con abrasivo del fluido que transporta (aire), y por su facilidad en el montaje.

4.2.2 Compresor:

La elección del compresor es totalmente libre, el que se aporta a continuación es a modo de ejemplo. En el presente caso, el compresor elegido es el de la marca Josval, modelo Mistral, con una capacidad de suministro de aire de 285 m³/h, y una presión máxima de trabajo de 13 bar.

En la instalación se ha tomado la decisión de instalar dos equipos compresores para poder ser alternados en turnos, para tratar de alargar su vida de funcionamiento útil.

Seguidamente, y tras la instalación de los compresores, se dotará de un gran acumulador de aire comprimido, para asegurar el abastecimiento continuo de aire, y finalmente y debido a la longitud de las tuberías instaladas, se colocará un acumulador de dimensiones más reducidas al anterior, para asegurar un abastecimiento de aire a la presión requerida, con el fin de minimizar las posibles pérdidas de carga.



Figura 22. Compresor de aire Josval, modelo Mistral

4.2.3 Otros accesorios necesarios para el funcionamiento.

En primer lugar, se instalan válvulas de seguridad calibradas a la presión de trabajo fijada en 13 Bar, basados en experiencias de casos anteriores, por ejemplo en sistemas parecidos al que se está tratando, como son el sistema de aire de arranque del motor y el sistema del tifón.

Además, se disponen de los equipos básicos de funcionamiento para este tipo de sistemas, que son los filtros, reguladores de presión y lubricadores y válvulas de seguridad.

Con todos los elementos necesarios para la inyección de aire comprimido en la capa límite del fluido colindante al buque situados y dimensionados, se pudo proceder con el punto clave de la aplicación de esta técnica, que es la modificación del casco.

4. Diseño de un sistema de lubricación por aire para un buque real

La realización de agujeros a través de la cual se pueda inyectar el aire no es nada complejo, ya que en el casco del buque existen múltiples agujeros que conectan con varios servicios como son el de refrigeración de los motores de combustión interna, sistema de achique, etc.

Se dispondrá una caja con micro-agujeros (o caja porosa) con perforaciones de hasta 20µm de diámetro. El aire pasaría a través de esta caja porosa para poder ser insertada en la capa límite. En el lugar donde se ubique la mencionada caja, deberá dotarse de una válvula de cierre y antirretorno para evitar que el agua entre en el interior del buque, imitando el funcionamiento de las tomas de mar.

Como se ha ido exponiendo, la instalación del sistema es relativamente habitual, la cual combina varios sistemas ya instalados a bordo, por lo que el mantenimiento no será nada fuera de lo normal. Pudiéndose delimitar los trabajos en el interior del buque principalmente en los compresores, y todo el plan de mantenimiento facilitado por el fabricante del mismo, y control del estado de las tuberías de PVC. No obstante, cuando el buque se saque a flote para realizarle el mantenimiento periódico, se deberá realizar un mantenimiento de limpieza a las tomas de mar, y sustitución de las piezas dañadas, además de utilizar de forma habitual, productos desincrustantes para evitar obstrucciones en los pequeños poros de la caja dotada de micro-agujeros.

5. R+I+D de la lubricación por aire

En apartados anteriores se ha descrito en profundidad el mecanismo de funcionamiento de la técnica que ocupa al presente trabajo, que es la lubricación del casco por aire. Una de las principales problemáticas que se ha detectado en anteriores apartados demuestra ser la contención del aire por debajo de la línea de flotación debido a naturaleza del fluido tratado y la diferencia de densidades entre ambos.

La mencionada técnica, aunque buena, en el momento de redacción del presente trabajo, no es plenamente efectiva, ya que tiene carencias en varios flancos de su aplicación. Básicamente se concentran en dos puntos, la generación de microburbujas de aire es un punto importantísimo, y la reacción natural del aire en entorno acuático, es otro de los limitantes de la aplicación de esta técnica.

5.1 Generación de microburbujas

Primero de todo, la generación de microburbujas de aire nos supone un problema, ya que como se ha comentado anteriormente la principal importancia es que las burbujas sean de un tamaño muy reducido, tomando como valor de referencia las 20 μm que se han comentado con anterioridad. Hoy en día, la generación de estas microburbujas es muy compleja, ya que no solamente es importante tratar de inyectarse a través de microburbujas, sino que también se ha demostrado en experimentos expuesto en este trabajo que su tamaño también depende de la velocidad del flujo al cual se generan estas microburbujas.

Sin embargo, se ha demostrado que la aplicación de estas microburbujas no solamente queda limitado al campo de la técnica / mecánica, sino que también es aplicable al campo de la medicina. Actualmente en este ámbito se están desarrollando técnicas para poder suministrar los medicamentos mediante las mencionadas burbujas, con el objetivo de poder suministrar los fármacos de una forma más rápida e efectiva. Todo ello, es positivo porque se llegará a descubrir mecanismos para la generación de microburbujas, ya que existen muchos intereses para ello.

Otra aplicación de las microburbujas que mucha gente puede tener instalado en su hogar, en el interior de peceras o bien en equipos de tratamiento del aire, es para oxigenar el ambiente en el que se están aplicando las microburbujas.

Repasando la historia, podemos comprobar que los primeros intentos para la generación de microburbujas de aire han sido la aplicación de un cable de cobre desnudo, al alrededor de un cuerpo para efectuar la hidrólisis del agua, de ello se obtenía en forma de burbujas de muy reducido tamaño, oxígeno. Cabe destacar que su aplicación, obtuvo muy buenos resultados durante el ensayo desconociéndose el motivo de ello.

Si para la generación de microburbujas se tomara la idea anterior, su uso se reduciría a la instalación eléctrica de cables alrededor del buque teniendo en consideración de los efectos que podría generar dichas corrientes inducidas en forma de corrientes galvánicas.

Otra posible consideración es la aplicación del mismo aire comprimido que usa la firma Mitsubishi en sus instalaciones MALS, modificando la forma de aplicación del aire en la capa límite. Partiendo como la base aplicada por la firma Mitsubishi como buena, y modificando la forma que tiene de generar las microburbujas, mediante el uso de tejidos técnicos, con una porosidad pequeña o bien uso de materiales porosos como el corcho o materiales similares, los cuales sometidos a ciertas condiciones de trabajo permitan la creación de las burbujas del tamaño deseado.

Una de las posibles ventajas que tiene el sistema mencionado anteriormente, es que mediante el uso de materiales que se pueden tener más o menos cerca, se pudiera simplificar la problemática previamente expuesta para la generación de microburbujas.

No obstante, se debería estudiar como de porosos son los materiales que tenemos cerca, o si bien, se debería experimentar con la fusión de distintos tipos de materiales para obtener el producto deseado.

Por todo ello, se considera la presente propuesta como una posibilidad para explorar en este sentido.

Actualmente la naviera Royal Caribbean que, en algunos de sus buques de última generación, como el M/S Harmony of the Seas y el M/S Quantum of the Seas, se les ha instalado una planta de inyección de aire comprimido.

Con la información proporcionada a través de los canales de comunicación de la mencionada Naviera, describen el presente sistema como si el buque surfeara encima de un cojín de aire que durante su operación les permite un ahorro de hasta el 10% (8%-7% neto) del consumo de combustible.

El procedimiento usado para la generación de las microburbujas inyectadas en la capa límite, no está muy detallado si bien, se sabe que el aire previamente a ser inyectado se calienta y posteriormente se enfría para evitar que el aire de insertado tenga presencia de vapor de agua, lo que reduciría la vida de la microburbuja a lo largo de la eslora del buque.

Tomando las palabras del Ingeniero responsable de la construcción de los mencionados buques, el Sr. Harri Kulovaara, su instalación producto de la colaboración de las firmas Foreship, ProcessFlo y Meyer Werft, se ha basado en sistemas ya existentes como el MALS, y algún otro sistema ya instalados en la flota mundial.

5.1.1 Generación de microburbujas mediante ultrasonidos

No solamente puede ser aplicadas técnicas ya existentes que mejoradas puedan considerarse como las únicas e inamovibles, a lo mejor buscando en base a otras técnicas, como pueden ser los ultrasonidos se podría aplicar para la generación de microburbujas. La idea se ciñe a la instalación de generadores de ondas de ultrasonidos alrededor de una tubería de agua salada la cual mediante la transmisión de dichas ondas se generarían microburbujas.

El principio de funcionamiento se basaría en el principio de apertura y cierre de una válvula muchas veces por segundo para tratar de generar pequeños impulsos de aire que pudieran transformarse en microburbujas, es decir, liberar cantidades muy reducidas de aire las cuales serían transmitidas a un flujo de agua tomado a través de las tomas de mar aguas arriba del punto de inyección del aire con microburbujas. Sin embargo, la cantidad de veces que se debería abrir la válvula por segundo es tan elevado que no existe mecanismo que pueda suplir dicha funcionalidad.

Pensando en motores de alta frecuencia como son los motores de competición. El volumen de las microburbujas es tan pequeño, que el tiempo que permanecería abierta la válvula para liberar

el aire necesario para generar una microburbuja sería demasiado grande, lo que no sería útil, debido a las pequeñas cantidades de aire requerido por cada microburbuja.

Para tratar de encontrar una solución al antedicho problema, se propone el uso de ondas ultrasonidos, su efecto es el de comprimir el aire a través del cual se transmite, entendiendo las ondas como aire comprimido un intervalo de tiempo t , en microsegundos, lo que justamente sería necesario para el mencionado problema.

Además de cuadrar con lo que se buscaba, no sería necesario el uso de válvulas un aspecto positivo ya que, a más componentes mecánicos mayor es la posibilidad de sufrir averías.

5.1.2 Generación de microburbujas mediante energía electrostática

Otro de los sistemas que se deberían de explorar para la generación de microburbujas sería la energía potencial electrostática. El motivo de la anterior proposición deriva de un experimento casero realizado con un globo y un tejido de lana, y una capa de agua con partes de un agente espumante. Cuando el tejido de lana se fricciona con el globo, se genera en la superficie del mismo, energía potencial electrostática debido a la configuración de ciertas cargas puntuales.

Cuando el globo con las cargas puntuales situadas en su superficie se sitúa cerca de la capa de agua con agente emulsionante, el agua resulta atraída por efecto de la energía potencial electrostática generándose burbujas en la superficie del agua.

Por todo lo anteriormente descrito, mediante el uso de algún componente alrededor del casco del buque se generaría fricción que permitiría la generación de burbujas en la zona colindante al casco.

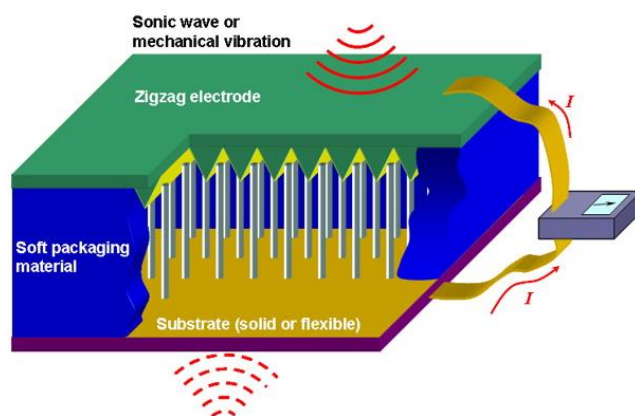


Figura 23. Esquema funcionamiento energía electrostática a través de un piezoeléctrico

Uno de los campos que más investigación se está realizando en el sector naval, son las pinturas, ya que como se ha comentado a lo largo del presente trabajo, la resistencia con origen viscoso tiene gran relación con el contacto del fluido que rodea al buque. Por eso el desarrollo de pinturas que permitan una resistencia al avance baja es una necesidad para el sector.

No solamente para la resistencia son importantes las pinturas, sino que también lo son para la protección del casco, para evitar la formación de fouling y de otros microorganismos que aumentan aún más la resistencia al avance.

5.1.3 Generación de microburbujas a través de pinturas

Otra posible forma de aplicación de la técnica de inyección de aire sería mediante el uso de pinturas que al paso del agua a cierta velocidad liberen algún tipo de sustancia o bien por medio mecánico, que generen las ya conocidas microburbujas.

Todos los métodos descritos anteriormente no son necesario grandes instalaciones en el interior para poder ser llevada a cabo la técnica objeto de interés.

No solamente es útil la pintura en el campo de asistencia a la aplicación de la inyección de aire, sino que también puede ser usada como medio de reducción de la resistencia al avance. La idea es la misma, se tiene el objetivo de evitar que el agua quede pegada a la superficie del casco, para ello se buscan pinturas que tengan una superficie muy deslizante. Teniendo como objetivo la intención de conseguir pinturas hidrofóbicas, es decir, que eviten cualquier contacto del agua con la superficie del casco.

También podría usarse pinturas hidrofóbicas, pero su alto coste y poca duración tras su instalación (alrededor de 1 mes de efectividad), motivo por el cual su uso queda descartado.

Resulta interesante tener en consideración el producto de la firma International (Azko Nobel), conocido como Interseek 1100SR, que es capaz de eliminar el fouling generado por el contacto con el mar sin uso de biocidas, aunque este permanezca largos períodos de tiempo parado.

La combinación del recubrimiento anteriormente expuesto con la técnica presentada podría representar una gran mejora para el consumo de combustible y emisiones de CO₂.

5.2 Control del flujo

Como comentado al inicio del presente apartado, otro de los problemas que surgen durante la aplicación de la inyección de aire comprimido es la contención en el fondo plano de la quilla de las microburbujas.

5.2.1 Control del flujo mecánicamente

En todos los buques en los cuales se quiera disponer de lubricación por aire, se deberá disponer de sistemas para guiar las microburbujas en el lugar que sea necesario, si bien en el caso de buques nuevos, puede diseñarse cascos con formas y con apéndices que ayuden a conducir el flujo en la dirección más conveniente.

Un ejemplo de ello podrían ser perfiles situados a lo largo de la eslora del barco que ayudaran a contener el flujo en las condiciones deseadas, dichos perfiles deberían actuar a modo de canalizadores, como se hace en la Formula 1, que se canaliza el aire hacía las zonas deseadas para poder obtener un trabajo del mismo.

Debería estudiarse al mismo tiempo, como de positivo podría ser convertir la quilla de balance en guías para mantener el flujo de microburbujas en el lugar indicado, sabiendo que el uso de quillas de balance puede generar un aumento de la resistencia al avance y de esta forma tener dos funciones con solo apéndice. El uso de difusores puede añadir tal grado de resistencia que contrarrestara el efecto de las microburbujas.

Además, dependiendo del punto y condiciones de aplicación, puede ser que el uso de un difusor de microburbujas no sea necesario para asegurar que no llegue ninguna de ellas al propulsor.

5.2.2 Control del flujo mediante el uso del magnetismo

A modo de experimentación, y sabiendo que la molécula de agua presenta un dipolo magnético, podría prestarse el agua para ser sometida a un campo magnético el cual sea repelente, siendo una posible forma de mantener alejada el agua de la zona del casco.

Si bien, la fuerza de este dipolo no permite mantenerla alejada, podría obtenerse una reacción que no permitiera mantener las moléculas de agua tan pegadas a la pared de la zona de la obra viva. Esta es una posibilidad que se podría explorar pero que requiere de mucha experimentación, y hasta la fecha, no se ha encontrado mucha información relativa a la misma.

Cabe indicar que, si se abre levemente el grifo de agua, y este se somete a un campo electrostático externo, se puede observar como el mencionado flujo queda afectado por el campo potencial, desviándose de su trayectoria natural.

6. Otras utilidades de la lubricación por aire

A lo largo de este trabajo solamente se ha planteado la aplicación de esta técnica entorno a un sólido que principalmente era el casco de un buque. Pero si se plantea de forma abierta la situación se puede comprobar que la aplicación de esta técnica no solamente queda reducida a la aplicación naval, sino que puede usarse en otros muchos ámbitos.

Evaluando el caso, la lubricación por aire puede ser usada en cualquier situación en que un fluido avanzando hacia una dirección, se encuentre en contacto con una superficie.

Un ejemplo de ello, son las tuberías, en ellas se transporta en la mayor parte de veces fluidos que circulan a una velocidad que puede diferir entre las diferentes regiones de la misma, esto no solamente genera pérdidas de carga que se traduce en la necesidad de instalar una mayor potencia de bombeo, además de la creación de esfuerzos internos por el efecto de la viscosidad en las paredes de las tuberías.

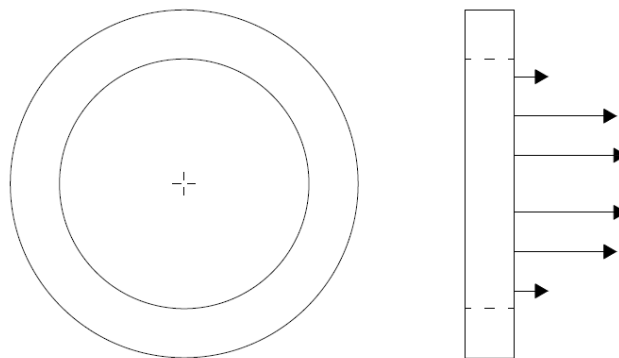


Figura 24. Perfil de velocidades de la tubería

Una forma de evitar que se produzcan estos fenómenos es mediante el uso de la lubricación por aire, si bien, no es tan fácil como simplemente aplicar esta técnica al fluido transportado en el interior de la tubería, ya que muchas veces se trata de productos químicos que con la presencia de aire puede perjudicar la condición del mismo.

Además, en fluidos como puede ser el vapor de agua, se trata de disminuir al mínimo la presencia de gotas de agua que, a cierta velocidad, pueden actuar como agente abrasivo y afectar al estado de la tubería. Por lo que este fenómeno se deberá tener en consideración a la hora de aplicarse en según qué circunstancias.

Un ejemplo de aplicación de la inyección de microburbujas podría ser en los oleoductos que cubren grandes distancias. Para este tipo de instalaciones, es necesario la instalación de varios puntos de bombeo a lo largo de su recorrido para elevar la presión, ya que por efecto de la fricción con la tubería la presión se ve mermada.

Cabe remarcar que su efecto solamente se limita a la superficie, ya que es el punto de contacto del líquido y por lo tanto la lubricación por aire se debería aplicar en el diámetro interior de la tubería.

No obstante, se tendría que estudiar con detenimiento sus pros y contras, porque se deberá determinar el comportamiento del fluido transportado con el aire, la necesidad de instalar muchos puntos de inyección a lo largo de los kilómetros que componen dichas tuberías.

No solamente es aplicable a tuberías de grandes kilómetros, sino que aprovechando los sistemas instalados a bordo, también se podría usar para las tuberías de transporte de fueloil, por ejemplo, ya que debido a su elevada viscosidad el transporte del mismo es complicado. Aunque se desconoce el mecanismo por el cual es tan efectivo la inyección de microburbujas, el efecto principal podría ser disminuir la viscosidad efectiva, lo que haría mucho más fácil su transporte a bordo.

Para tuberías de transporte de agua, se podría instalar el sistema de ultrasonidos, ya que debido a la longitud de las tuberías, puede ser difícil instalar sistemas de aire comprimido, tomando las ventajas de la facilidad de uso e instalación de los ultrasonidos.

7. Estudio práctico de las teorías aportadas

A lo largo de este trabajo se ha ido presentando las ventajas e inconvenientes del uso de la lubricación por aire en los buques. Al objeto de demostrar su funcionamiento práctico y poder mostrar todas las teorías expuestas a lo largo del trabajo.

7.1 Cuestiones previas

Como ya se ha tratado el caso del buque porta contenedores Emma Maersk, para poder realizar los ensayos nos vamos a basar con una maqueta a escala del mencionado buque.

Dicha maqueta fue fabricada, mediante la impresión de la misma en una impresora por aportación de material plástico, que había sido construido a través de un programa de edición en 3D. Que se haya construido la maqueta con impresora 3D, permite realizar modificaciones a las formas del buque obteniendo el resultado de una forma más fácil.

El objetivo de estos ensayos es tratar de analizar el comportamiento de la maqueta sin ninguna modificación, y ver qué es lo que sucede cuando a la misma maqueta se le incorpora las modificaciones que se han presentado a lo largo del trabajo.

Lo necesario para la ejecución de los ensayos, como ya comentado, es una maqueta de un buque, en el caso que estamos comentando es una maqueta del buque M/S Emma Maersk. El tamaño de la maqueta está directamente relacionado con las formas del mismo, es decir, a mayor tamaño, las formas de la maqueta serán más parejas a las formas del buque a escala real.

Además de la maqueta, para los ensayos será necesario tener la posibilidad de disponer de un canal de ensayos hidrodinámico. Dichos ensayos también podrían ser llevados a cabo en alguna piscina, si bien, la velocidad de ensayo vendría marcada por la velocidad procedente de los skimmers.

La idea para la ejecución de este ensayo sería colocar el buque en uno de los extremos del canal con aguas tranquilas, y mediante un carro hacer avanzar el buque a lo largo del canal o en el caso que no se disponga de ello, en la piscina.

El uso del carro es opcional, pero es un recurso habitual en los canales de ensayo, en cualquier caso, lo que se busca es tener un medio a través del cual, se le pueda dotar a la maqueta, que no dispone de mecanismos de autopropulsión, de una velocidad preestablecida.

Para este tipo de ensayo, y siendo la resistencia viscosa muy complicada de calcular con los medios disponibles, se podría usar un dinamómetro fijado en uno de sus extremos y el otro fijado en la maqueta a ensayar.

En los canales de ensayo se disponen de sensores y equipamientos que permiten obtener resultados muy concretos de los ensayos realizados.

Debido a las necesidades de los ensayos que se presentan, no será necesario el uso de todo el mencionado equipamiento, sino que se busca encontrar una dimensión que permita comprobar los efectos de la lubricación por aire en la resistencia al avance. Siendo un medidor de fuerza la opción escogida.

El objetivo básico es obtener una lectura de la dificultad o facilidad que tiene la maqueta a avanzar en cada una de las condiciones que se describirá a continuación. Siguiendo la lógica que el carro que se disponga para hacer avanzar el buque a una velocidad marcada deberá ejercer una fuerza F , en condiciones normales, querremos saber cómo se verá modificada dicha fuerza F cuando las condiciones se vean modificadas.

A parte de comprobar todo lo anteriormente aportado, es cierto que sería positivo poder determinar mecanismos de funcionamiento de las microburbujas, por lo que primero se debería determinar cómo funcionan. Por ello, se establecería como necesario el uso de cámaras subacuáticas para determinar cómo actúan y cómo interactúan con el medio colindante.

7.1.1 Proceso constructivo de una maqueta del buque M/S Emma Maersk en 3D

En apartados anteriores se ha aportado qué sistemas y equipos se deberían instalar en el interior del buque para poder instalar el sistema de lubricación por aire en el buque objeto de nuestro interés.

Tras haber aportado todas las teorías que muestran el mecanismo de funcionamiento de la lubricación del casco por aire, además de aportar cuáles son sus puntos fuertes y cuáles son los puntos en que esta técnica debería mejorar, sería necesario la realización de ensayos para demostrar y poder analizar los resultados obtenidos.

Para que estos ensayos puedan ser llevados a cabo, se precisa la construcción de un modelo a escala de las formas del casco del barco que se ha tratado a lo largo del presente trabajo, el M/S Emma Maersk.

Considerando las opciones que se pueden utilizar para la construcción de una maqueta tales como, la madera, mediante el uso de la marquetería; la cera, mediante el uso de moldes y su talla; plástico caliente, ablandándose con el uso de calor para lograr las formas deseadas o bien, el uso de una impresora en 3D, usando plástico tipo ABS obteniendo de una forma más ágil las formas deseadas.

Habiéndose tomado la decisión de construir la maqueta del portacontenedores Emma Maersk, mediante el uso de la una impresora de extrusión de plástico en caliente, debido a sus ventajas expuestas, es necesario el uso de un soporte digital que permita el diseño de las formas del casco.

Debido a los conocimientos personales del programa de diseño en 3 dimensiones, Solidworks, producto de la firma Dessault Systems, se ha desarrollado la maqueta en 3D y se ha trasladado el resultado obtenido a una impresora en 3D.

A continuación, se procederá a comentar el proceso constructivo en el mencionado programa de la maqueta que será usada para los ensayos.

Partiendo desde el programa vacío se deberá determinar en qué sentido de los ejes se dispondrá el buque. Como se pudo observar en la siguiente imagen, el buque se halla dispuesto con imágenes de los planos en planta, alzado y perfil para poder trazar de forma exacta las curvas que componen la superficie del casco. Como ya es sabido, la curvatura del casco de un buque está compuesta por múltiples superficies de distintas direcciones y sentidos, para ello, se va a dividir el buque en rebanadas, para posteriormente coser las superficies entre ellas.

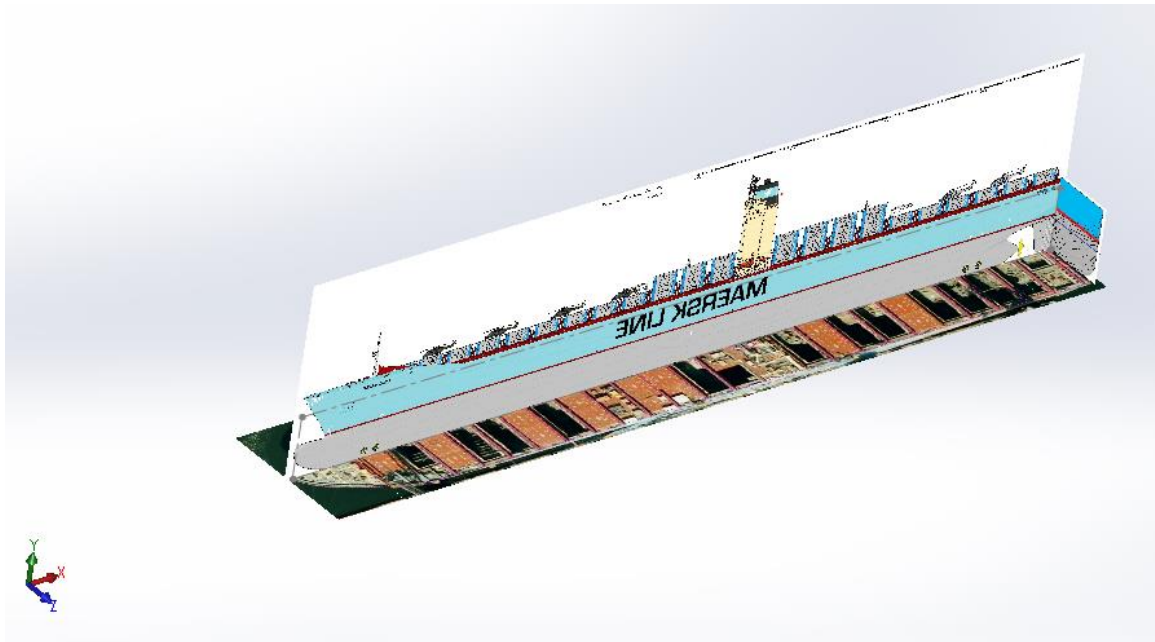


Figura 25. Disposición de los planos del buque

En base a la relación de simetría entre ambos costados del buque, se construye en uno de los costados del buque, en nuestro caso se empieza construyendo por la zona de estribor-proa. Trazando las curvas por rebanadas como anteriormente mencionado. La construcción de la superficie se realiza mediante el uso del comando del programa “Recubrir Superficie”.

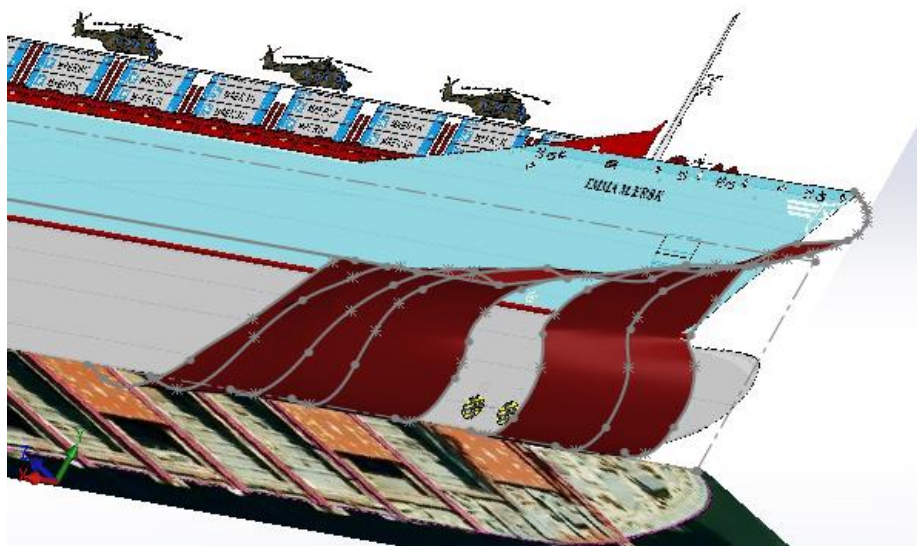


Figura 26. Curvas de la zona de proa

Siguiendo la construcción hasta media eslora del buque, para pasar posteriormente a la zona de popa para empezar con la construcción de las formas de dicha zona, y posteriormente seguir avanzando y realizar el empalme de superficies en la zona central del buque en cuya zona sus formas son prismáticas.



Figura 27. Curvas de la zona de popa

Seguidamente, se procede con la construcción del espejo de popa y de la finalización de la zona del castillo de proa, obteniéndose la mitad de las formas del buque plenamente construidas. Finalmente, se procede con la definición de la línea de flotación y la simetría del casco.

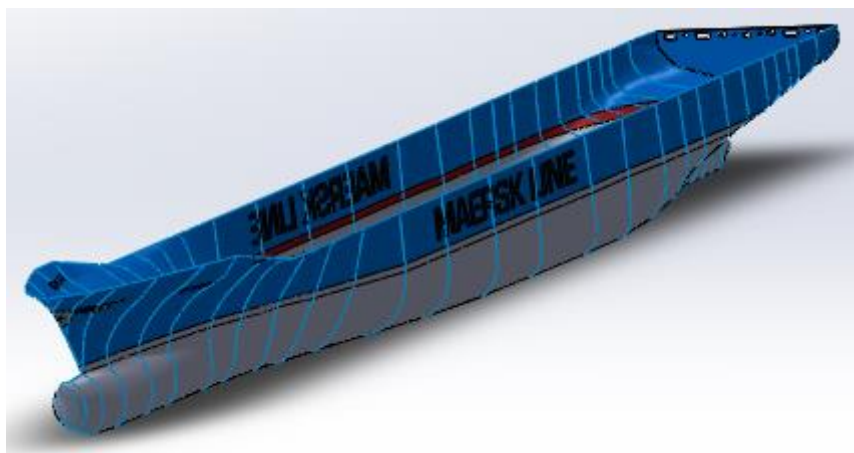


Figura 28. Superficie del casco en su totalidad

Con todo esto, se tienen las formas del casco totalmente construidas, pero no es hasta el momento suficiente para poder ser impreso, ya que como es sabido la superficie no tiene volumen y no es apta para la impresión.

Para ello, se generará un bloque sólido de dimensiones iguales a las del buque a través de la cual será esculpido mediante el corte del bloque con la superficie generada por las formas, dicha operación se llevará a cabo mediante la ejecución de la herramienta “Corte por superficie”, obteniéndose el siguiente resultado.

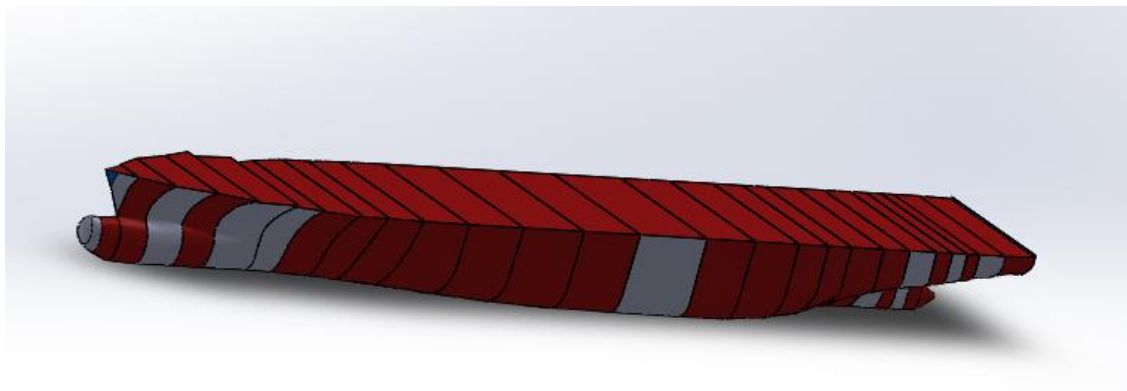


Figura 29. Buque en sólido, cortado por las superficies descritas

Una vez obtenido el sólido total del buque, será necesario vaciarlo ya que puede ser de interés el obtener un modelo con compartimientos para realizar diferentes condiciones de navegación. Con el fin de obtener el resultado anteriormente mencionado, se utiliza la herramienta “Extruir corte” a las zonas que se desee vaciar.

Durante este proceso, también se le deberá añadir al modelo refuerzos, ya que cuando se imprima el buque utilizando la impresora en 3D, las paredes serán muy finas y podrían doblarse hacia el interior. Para evitar que puedan surgir errores durante el proceso de impresión, se disponen de unos refuerzos como puede comprobarse a continuación.

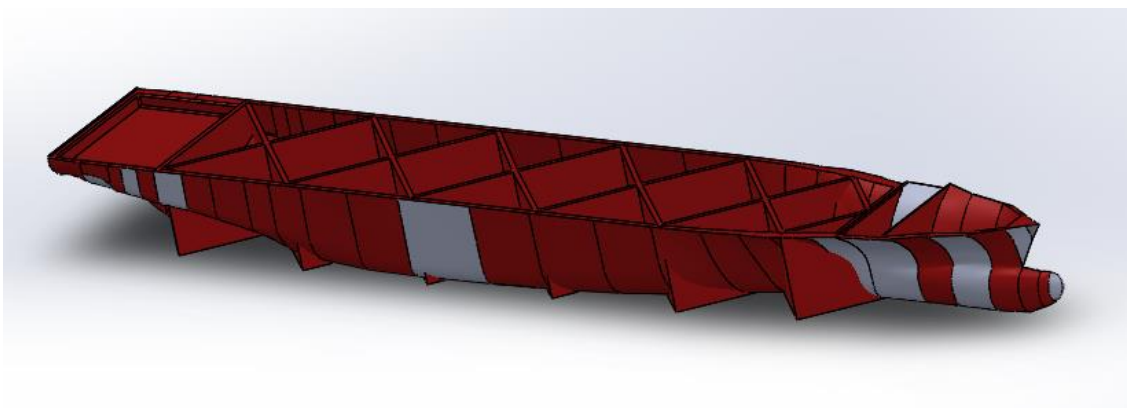


Figura 30. Sólido vaciado con refuerzos

Como se puede observar, dichos refuerzos no solamente dotarán al barco de rigidez, sino que además lo compartimentarán para poder tener el control del trimado del buque, y que avance en las condiciones de navegación deseadas, tratando de ser lo más parejas a la realidad.

Finalmente, con el proceso de diseño finalizado, solamente se deberá proceder a la impresión del mismo. Sin embargo, se tendrán que tomar decisiones en este punto que puedan ser determinantes a la hora de llevar a cabo los ensayos, por ejemplo, la determinación de la eslora y manga del modelo.

Las dimensiones quedarán afectadas por la capacidad que tiene la impresora para imprimir, es decir, las impresoras en 3D tienen una pletina sobre la cual disponen su modelo durante el proceso de impresión, en concreto el modelo usado para imprimir la maqueta objeto de nuestro interés es de 15x20 cm, si bien, dichas dimensiones son insuficientes. Lo que significa, que no se podrá imprimir el modelo de una sola pieza, sino que deberá partirse en dos partes para obtener unas dimensiones aptas para los ensayos.

Tras 8 horas de impresión, se obtienen dos piezas de 16 cm cada una, lo que significa un barco de 32 cm de eslora total. Seguidamente, se unen las dos piezas con el uso de un adhesivo instantáneo de fuerte pegado, habiendo preparado previamente la superficie de unión.

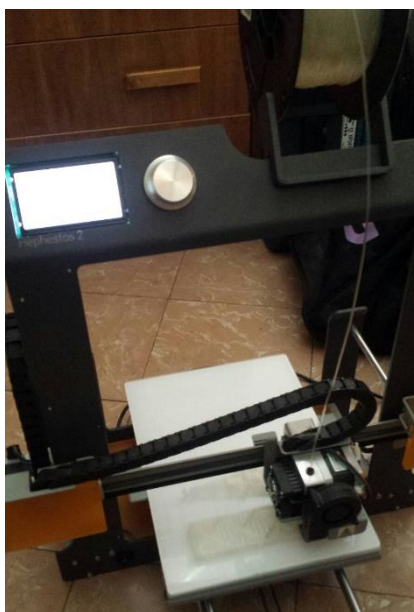


Figura 31. Proceso de impresión de la maqueta

Como se ha podido comprobar en imágenes anteriores, el modelo presenta refuerzos exteriores que se deben recortar y dejar a nivel de la superficie, al objeto de tenerla lo más lisa posible. Debido al lijado de los refuerzos se han podido generar rugosidades, hecho que no interesa y por ello se aplicó una capa de cola blanca para dotar a las formas de una mayor suavidad.

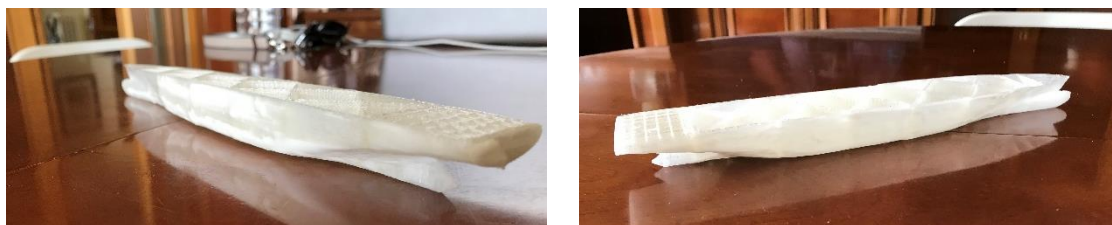


Figura 32. Modelo impreso

7.1.2 Fecha y lugar de los ensayos realizados

En fecha 8 de octubre de 2017 se llevaron a cabo una serie de ensayos, para comprobar las teorías expuestas a lo largo del presente trabajo. Como es sabido, para poder llevar a cabo los mencionados experimentos se requerirá de un canal de ensayos, si bien, dichas instalaciones son de difícil acceso, por ello se procedió a construir un canal de ensayos casero.

En el jardín de casa, y mediante el uso de listones de madera y plásticos impermeables se consiguió la mencionada instalación. En primer lugar, se dispusieron cuatro bloques de cemento sobre de los cuales se colocaron longitudinalmente dos listones de madera. En una zona de terreno llano para evitar cualquier variación de la profundidad.



Figura 33. Construcción del canal de ensayos

Sobre los mencionados listones se dispusieron los plásticos que servirían para contener el agua dulce que nos permitiría realizar los mencionados ensayos. En concreto, se usó un plástico grueso para evitar que cualquier partícula pudiera dañar el plástico contenedor, encima éste último, se colocó un plástico transparente impermeable y finalmente, se pudo proceder con el llenado del mismo.



Figura 34. Canal de ensayos finalizado

Las dimensiones del anteriormente expuesto canal son 2,80 m de largo, 40 cm de ancho y 20 cm de profundidad. Por el tamaño del modelo, se consideró suficiente para que las perturbaciones generadas por el avance del mismo no interferirían a los resultados obtenidos. Como se pudo comprobar el tipo de canal de ensayos hidrodinámicos es de aguas tranquilas, lo que requería de un medio que proporcionara propulsión al modelo a ensayar ya que, el mismo no dispone de medios autopropulsivos.

Para la propulsión también se usaron soluciones caseras, mediante el uso de un taladro que puede ser usado a distintas velocidades, el cual tenía acoplado una broca de M12 y a su vez tenía un carrete de hilo de Nylon, que se iba cobrando y soltando cabo según necesidad.



Figura 35. Taladro con rollo de Nylon

El taladro se colocó en uno de los extremos del canal, permitiendo que el hilo que tiraba del modelo y artefactos se mantuviera totalmente horizontal.

No solamente se realizaron ensayos en el canal durante la mencionada jornada, sino que también se realizaron ensayos en barreños de agua tranquila, para poder experimentar con las burbujas y poder analizar su tamaño.

Los barreños que se usaron tenían un diámetro de 60 cm, con una profundidad de 25 cm para evitar que dichas burbujas generadas fueran contenidas en un espacio reducido.

7.1.3 Instrumentos de medida usados en los ensayos

El objeto de todos los ensayos es de obtener unos resultados, si bien, dichos resultados pueden dividirse en cualitativos o bien cuantitativos, en el caso de los cuantitativos se requerirá de instrumentos de medida.

Para el caso que nos ocupa, usamos en primer lugar, un dinamómetro, que es un dispositivo que permite medir la fuerza que se aplica en el eje de medida. El principio de funcionamiento consiste en el uso un resorte con su constante de elasticidad conocida, y dependiendo de su grado de despliegue, se puede determinar la fuerza que se le está aplicando. A continuación, se expone el modelo usado.



Figura 36. Dinamómetro usado para mediciones

El dinamómetro de sensibilidad hasta 500g de fuerza y saltos de 5g, con escalas en libras y gramos. El mismo modelo dispone de un calibrador para partir desde una medida correcta.

Además, el mencionado dinamómetro dispone de dos ganchos para poder ser instalado en el lugar deseado.

Otro de los aparatos de medición que se usaron, fue un multímetro, que es un instrumento que puede medir voltaje e intensidad, tanto en corriente continua como corriente alterna, además de disponer de la capacidad de medir la resistencia del medio tratado.

En concreto, el mencionado multímetro fue usado para determinar la corriente que circulaba por el sistema de generación de burbujas.

Durante los ensayos realizados también se usaron elementos más habituales como puede ser el cronómetro digital, y una regla de 30 cm.

Todos los elementos usados, funcionaban de forma correcta, ya que previo a su uso para las prácticas, fueron testados, principalmente el multímetro y el dinamómetro.

7.2 Ensayos realizados

Los ensayos realizados se pueden dividir en tres grandes grupos, ensayos con placa plana, ensayos con el modelo a escala y ensayos con burbujas.

7.2.1 Ensayos de generación de microburbujas

Los ensayos que se procederán a describir en el presente apartado sirven para comprobar la efectividad de las técnicas aportadas a lo largo del presente trabajo para la generación de microburbujas. Las mencionadas técnicas que han sido propuestas con anterioridad, como son la generación de microburbujas por la electrolisis del agua, el uso de un compresor combinado con materiales porosos, la generación de microburbujas con ultrasonidos, también se ha propuesto el uso de pinturas que con la fricción con el agua de alrededor del casco puedan generar el efecto deseado.

Algunas de las técnicas aportadas no pueden ser comprobadas debido a la complejidad de ejecutar los ensayos, si bien, se han probado las técnicas más fáciles de aplicar en varios ensayos, como son la generación por microburbujas con compresor de aire combinado con materiales porosos y la electrolisis del agua.

Como se ha comentado, estos ensayos se llevan a cabo en el interior de un recipiente de agua abierto, el cual se le dispone de una regla para poder medir el tamaño de las burbujas obtenidas. Cabe indicar que el tamaño que se ha considerado como ideal para la aplicación de la técnica de las microburbujas se sitúa aproximadamente en 20 μm de diámetro de burbuja.



Figura 37. Recipiente donde se lleva a cabo el ensayo

Durante la realización de los ensayos, se decidió empezar por la técnica de aplicación más habitual y mayormente usada, que es el uso de un compresor de aire combinado con materiales porosos, en nuestro caso se usó distintos tipos de ropa y corcho de distintas densidades.

Este primer ensayo fue llevado a cabo, en el interior de un recipiente sin tapa con un volumen aproximado de agua de 10 L, en el fondo del recipiente se dispuso una regla para tener una referencia de los resultados obtenidos.

El compresor de aire está compuesto por una máquina que no dispone de regulador de caudal ni presión de aire a su salida, a la cual se le dispone de una manguera con una salida de aproximadamente 40 mm de diámetro al cual, se le dispuso varios tipos de tejidos para observar qué tamaño de burbujas se observaban a su salida.

Los resultados obtenidos en el primer intento eran burbujas de un tamaño en un rango de 3 a 5 cm de diámetro, lo que es un tamaño demasiado grande para los intereses que se buscan. Seguidamente, se buscaron otros tipos de tejidos, pero en ninguno de los cuatro tipos de tejidos probados (algodón, sintético, Lycra y combinación de alguno de los anteriores) se mostraron mejores resultados.

Siguiendo con el mismo tipo de técnica, se dispuso de un trozo de corcho a la salida de la manguera, que forzaba que el aire pasara a través del mismo. No obstante, y debido a la densidad de los corchos probados, el aire no podía atravesarlo y se decidió realizar pequeños agujeros para facilitar su circulación.



Figura 38. Configuración del compresor

Seguidamente se volvió a probar con la nueva configuración y las burbujas obtenidas tenían un tamaño inferior, de alrededor a 2 cm de diámetro, una reducción perceptible en comparación con la prueba anteriormente aportada.



Figura 39. Burbujas generadas por el compresor y material poroso

Con los resultados obtenidos de los anteriores dos ensayos, se procedió a un cambio con la modalidad de generación de microburbujas, que es el uso de la electricidad para separar las partículas de Oxígeno de las partículas de Hidrógeno, que componen el agua.

Para poder llevar a cabo el presente experimento, se necesitará de una fuente de electricidad continua, de cables conductores eléctricos y el anteriormente mostrado recipiente de agua.

En el presente caso, se preparó una batería de 24V que había servido hace años para un coche. Sin embargo, la batería no tenía suficiente capacidad para el fin que se requería. Debido a lo anterior, se tuvo que usar un cargador de baterías de coche (fuente de corriente continua de 12V o 6V) al cual se les conectó sus polos a los hilos conductores, que posteriormente se colocaron en el agua. En primera instancia, con los hilos sustancialmente separados se observaron pocas burbujas, mas a medida que estos se hallaban más cerca entre si, la resistencia de paso de la electricidad en el agua se reducía, pudiéndose un leve aumento de burbujas generadas.



Figura 40. Generación por electrolisis de microburbujas

La cantidad generada de burbujas no era suficiente, sin embargo, el tamaño de las microburbujas era el adecuado, por lo que se trató de mejorar la conductividad en el agua añadiéndole sal.

Pudiendo percibirse una notable mejora, y con lecturas de intensidad en el multímetro de hasta 0,42A.



Figura 41. Generación de microburbujas tras aplicar sal

La solución pasaba por aumentar la intensidad que circulaba por el circuito, para hacerlo, se cogió un tubo de cobre, se pulió para tener un mejor coeficiente de transmisión de electricidad y finalmente, se partieron para tenerlos a modo de ánodos.



Figura 42. Lectura del multímetro

Con las modificaciones aportadas, se pudieron percibir corrientes de hasta 2,82A, observando una gran cantidad de burbujas emergiendo desde el polo negativo, si bien cabe indicar que el gas generado en abundancia no era oxígeno sino, hidrógeno.

Dichas cantidades de burbujas generadas a tan altas intensidades, era posible debido a la cercanía entre los dos ánodos, pero debía prestarse mucha atención en no tocar los dos ánodos para evitar que se pudiera producir un cortocircuito.

Los tamaños de las burbujas observadas eran mucho menores a 1 mm de diámetro, si bien, con los medios para tomar medidas que se disponía no se pudo determinar con exactitud, su dimensión.



Figura 43. Comparación de los resultados obtenidos

7.2.2 Ensayos con placa plana

La base teórica que se ha aportado muestra como en muchos de los experimentos que se han llevado a cabo a lo largo de la historia de la hidrodinámica se realizaban con placas planas equivalentes en superficie mojada a la del modelo que se desea ensayar. Además, estos procuraron enfocar la interpretación de los resultados con los que estuvieran relacionados solamente con el fenómeno de la resistencia de fricción y dejar de lado los efectos que pudieran tener las formas en la resistencia total.

Una parte de la experimentación que se ha realizado en este trabajo ha sido mediante el uso de una placa plana equivalente. Cuya superficie es de $210,75 \text{ cm}^2$ (datos obtenidos a través del programa de edición en 3D). Con eso se podrá observar qué influencia se tiene de las formas en la resistencia de origen viscoso.

Cabe recordar que los experimentos se realizan para tratar de determinar el efecto de la resistencia viscosa en el avance del buque, descartando el estudio de la resistencia por formación de olas.

7.2.2.1 Ensayo con placa plana sin aplicación de microburbujas

Este ensayo ya se realiza en el interior del canal de ensayos, la configuración para realizar el ensayo se procede a describir a continuación.

Una vez la placa de 16 cm de costado y sección cuadrada está construida, esta se le acopla el hilo de Nylon que se enrolla en el taladro como se ha comentado al inicio de este capítulo. Seguidamente en entre la superficie plana y el enrollador, se coloca el dinamómetro, trabajando horizontalmente. El dinamómetro se coloca a una distancia prudencial de la superficie plana para evitar cualquier interacción positiva o negativa con la placa.

El presente ensayo consiste en dotar de una velocidad constante a la placa plana y tomar medida de la fuerza que se le tiene que aportar a la placa para que esta se mueva a una determinada velocidad.

Debido a la dificultad de acceder a un medidor de velocidad, se tuvo que utilizar otra forma para saber a qué velocidad se realizaba cada ensayo, por lo que sabiendo la distancia que recorre el artefacto y con la ayuda de un cronometro se puede determinar a qué velocidad se ha realizado el ensayo, partiendo de la base que el taladro nos permite mantener una velocidad constante durante cada uno de los ensayos.

Antes de realizar el ensayo se aseguró que el dinamómetro estaba bien calibrado, ajustándose a 0 g sin ninguna fuerza aplicada en su eje de medición. Las lecturas se consideraban correctas si en los ensayos realizados, la placa, no tocaba con el fondo, o bien con las paredes del canal de ensayos.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Velocidad [m/s]	Fuerza [N]	Fn	CT	Rn
0,24	0,49	0,137	0,794	67.959,37
0,25	0,98	0,141	1,498	69.947,35
0,29	0,54	0,162	0,619	80.701,75
0,32	0,44	0,180	0,414	89.296,55
0,44	0,49	0,248	0,241	123.444,37
0,46	0,64	0,260	0,286	129.122,81
0,52	0,59	0,295	0,204	146.730,46
0,61	0,78	0,342	0,203	169.898,43

Tabla 2. Resultados ensayos de placa plana sin burbujas

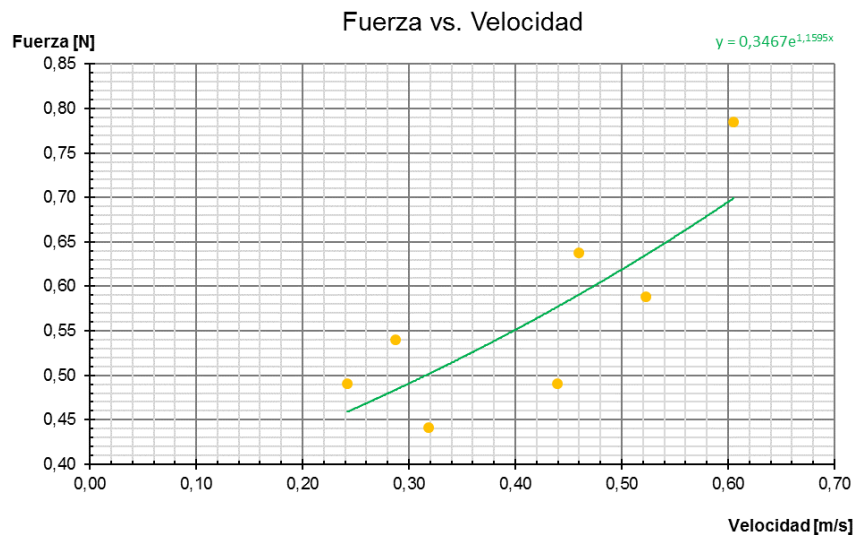


Figura 44. Gráfica de los resultados obtenidos

De los resultados anteriormente aportados se ha descartado el valor de la segunda fila, que tiene una fuerza medida de 0,98N; lo que resulta demasiado elevado en comparación a los otros resultados obtenidos.

Al mismo tiempo indicar que para valores de número de Froude mayores que 0,25 se descartaran para el análisis de los resultados obtenidos, ya que el número de Froude del buque real es 0,25.

7.2.2.2 Ensayo con placa plana con aplicación de microburbujas

Basándose en el planteamiento del ensayo anterior, se añadió a todo lo mencionado anteriormente, los ánodos que fueron usados durante el ensayo de las microburbujas, para generar un flujo que pudiera afectar a placa plana.



Figura 45. Disposición aproximada del ensayo

Debido al tamaño de los ánodos, para evitar que la interferencia que generan estos con el agua afecte de forma negativa a la placa plana, estos se tenían que disponer a una distancia suficientemente alejada, pero el problema que se derivaba era que las burbujas quedaban muy dispersas cuando entraban en contacto con la placa.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Velocidad [m/s]	Fuerza [N]	Fn	CT	Rn
0,24	0,44	0,137	0,715	67.959,37
0,29	0,54	0,162	0,619	80.701,75
0,32	0,44	0,180	0,414	89.296,55
0,44	0,49	0,248	0,241	123.444,37
0,46	0,49	0,260	0,220	129.122,81
0,52	0,54	0,295	0,187	146.730,46
0,61	0,78	0,342	0,203	169.898,43
0,92	0,93	0,519	0,104	258.245,61

Tabla 3. Resultados ensayos de placa plana con burbujas

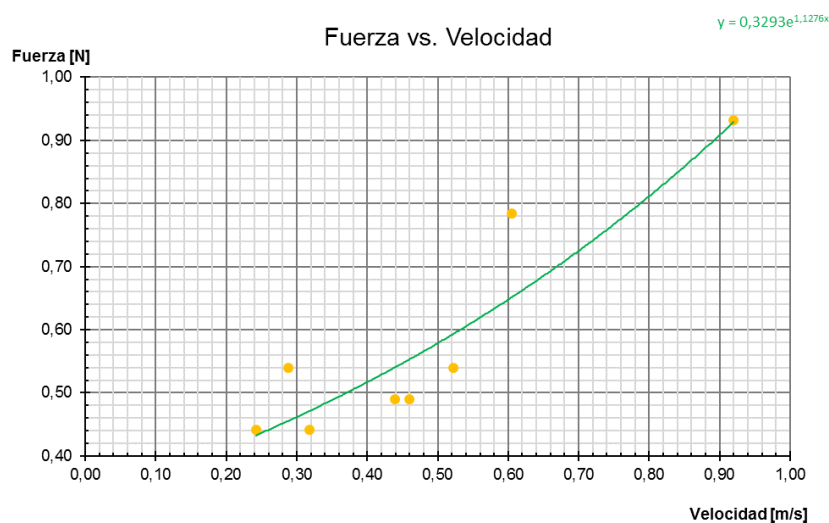


Figura 46. Gráfica de los resultados obtenidos

En este caso, todas las lecturas se pueden considerar correctas, hay un punto con una leve desviación, cuyo valor de fuerza medida es 0,78N.

7.2.3 Ensayos con modelo a escala

En este apartado, se procederá a realizar el mismo tipo de ensayos que se han descrito anteriormente, pero con el simple hecho que se sustituye la placa plana, como comentado, el objeto de este ensayo es saber cómo se comportará de forma más aproximada a la realidad el buque.

En este caso, se ha tenido que tener en consideración varios aspectos para evitar posibles malas lecturas o efectos de escala no deseados, como es la rugosidad ya que, si el barco como modelo es rugoso, el buque real tendrá una gran rugosidad. Por este motivo es importante tratar de reducir al mínimo la rugosidad, en nuestro caso se ha optado pulir el bien el material y darle una capa de cola blanca.

Ya con el modelo dentro del agua, y previamente al comienzo de las experimentaciones, se tendrá que proceder con el correcto trimado del modelo. Cabe recordar el hecho que el modelo está construido a escala del buque real y su flotabilidad es la misma marcada por el modelo real.

7.2.3.1 Ensayo con modelo a escala sin burbujas

Este ensayo ya se realiza en el interior del canal de ensayos, la configuración para realizar el ensayo se procede a describir a continuación.

Una vez el modelo construido en 3d se sitúa en el canal de ensayos, como en el caso anterior, se le acopla el hilo de Nylon que se enrolla en el taladro. Seguidamente, en entre la superficie plana y el enrollador, se coloca el dinamómetro, trabajando horizontalmente. El dinamómetro se coloca a una distancia prudencial de la superficie plana para evitar cualquier interacción positiva o negativa con el modelo.

El presente ensayo consiste en dotar de una velocidad constante a la placa plana y tomar medida de la fuerza que se le tiene que aportar al modelo para que esta se mueva a una determinada velocidad.

Debido a la dificultad de acceder a un medidor de velocidad se tuvo que utilizar otra forma para saber a qué velocidad se realizaba cada ensayo, siguiendo el modus operandi detallado con anterioridad, sabiendo la distancia que recorre el artefacto y con la ayuda de un cronometro se

puede determinar a qué velocidad se ha realizado el ensayo, partiendo de la base que el taladro nos permite mantener una velocidad constante durante cada uno de los ensayos.

Antes de realizar el ensayo se aseguró que el dinamómetro estaba bien calibrado, ajustándose a 0 g sin ninguna fuerza aplicada en su eje de medición. Las lecturas se consideraban correctas si en los ensayos realizados, el modelo, no tocaba con el fondo, o bien con las paredes del canal de ensayos.

Previamente al inicio de los ensayos, se comprobó que el barco navegaba en las condiciones idóneas habituales. Debido a los refuerzos localizados a la parte del espejo de popa, el buque se hallaba en $+1^\circ$ ó $+2^\circ$ de asiento apopante, aspecto positivo ya que generalmente los buques navegan en dichas condiciones.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Velocidad [m/s]	Fuerza [N]	Fn	CT	Rn
0,52	0,10	0,373	0,034	146.730,46
0,72	0,15	0,513	0,027	201.754,39
0,74	0,25	0,530	0,042	208.262,59
0,82	0,20	0,586	0,028	230.576,44

Tabla 4. Resultados ensayo con modelo sin burbujas

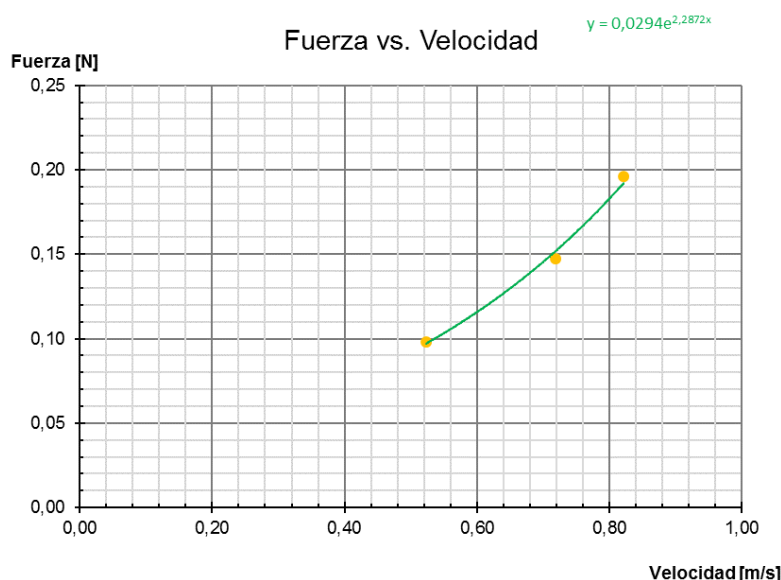


Figura 47. Gráfica de los resultados obtenidos

En la anterior gráfica se descarta el valor de 0,25N; ya que presentaba una desviación excesiva. Cabe aportar que en el presente ensayo fue bastante complicado poder obtener datos precisos, ya que el buque presentaba resultados con lecturas inferiores a los resultados observados en los ensayos de la placa.

7.2.3.2 Ensayo con modelo a escala con burbujas

Basándose en el planteamiento del ensayo anterior, se añadió a todo lo mencionado anteriormente, los ánodos que fueron usados durante el ensayo de las microburbujas, para generar un flujo que pudiera afectar al modelo a escala



Figura 48. Disposición aproximada de los ánodos durante el ensayo

Debido al tamaño de los ánodos, para evitar que la interferencia que generan estos con el agua afectara al modelo a escala, estos se tenían que disponer a una distancia suficientemente alejada, pero el problema que se derivaba era que las burbujas quedaban muy dispersas cuando entraban en contacto con la placa.

Tras haberse realizado los ensayos de la forma descrita anteriormente, los resultados no pueden ser presentados por falta de precisión durante la toma de datos. El rango de resultados que se podían interpretar se situaba aproximadamente en rangos de 20 a 10g de fuerza, siendo la escala del dinamómetro usado de hasta 500g, aportando lecturas erróneas.

7.3 Análisis de los resultados obtenidos

Una vez se han registrado todos los datos, se debe proceder con el análisis de los mismos, ya que su interpretación no se rige solamente con la lectura de los mismos, por lo que requiere un tratamiento previo para su correcta interpretación. Previamente, algunos resultados que fueron anotados durante la práctica han sido descartados debido a incoherencia con el conjunto.

En primer lugar, y como se ha comentado en el apartado de la base teórica sobre los fenómenos de la resistencia al avance, se habla en todo momento de Coeficientes adimensionales de resistencia, por lo que se deberá transformar los resultados obtenidos en forma de fuerza a coeficientes adimensionales, para hacerlo se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2}$$

Ecuación 5. Coeficiente adimensional de la resistencia total al avance

Donde el valor de R_T es la resistencia total medida con el dinamómetro, la densidad del agua 1 g/cm^3 , la superficie mojada del buque se aportará a continuación, y la velocidad de los ensayos.

El valor de la superficie es de $210,75 \text{ cm}^2$, dicho resultado se obtiene de los datos del modelo en el editor de sólidos en 3D. En caso que no fuera posible lo anterior, se podría utilizar el método de cálculo de Holtrop

Para seguir con el análisis de los resultados obtenidos, necesitaremos saber qué números de Reynolds teníamos para cada ensayo, como es conocida la fórmula para el cálculo del número de Reynolds, como sigue:

$$R_n = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Ecuación 6. Número de Reynolds

Donde el valor de V es la velocidad en m/s, L es la longitud característica en metros ($L=0.32 \text{ m}$), y finalmente, la ν viscosidad del agua. ($\nu_{\text{dulce}}=1,14 \cdot 10^{-6}$; $\nu_{\text{salada}}=1,19 \cdot 10^{-6}$)

Y para el cálculo del Número de Froude, se usó la siguiente fórmula:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{L \cdot g}}$$

Ecuación 7. Número de Froude

ENSAYO PLACA PLANA SIN BURBUJAS						
Velocidad [m/s]	Fuerza [N]	Fn	CT	Rn	ITTC	ITTC LAMINAR
0,24	0,49	0,14	0,79	67.959,37	0,00935	0,00509
0,25	0,98	0,14	1,50	69.947,35	0,00927	0,00502
0,29	0,54	0,16	0,62	80.701,75	0,00888	0,00467
0,32	0,44	0,18	0,41	89.296,55	0,00861	0,00444
0,44	0,49	0,25	0,24	123.444,37	0,00785	0,00378
0,46	0,64	0,26	0,29	129.122,81	0,00775	0,00370
0,52	0,59	0,30	0,20	146.730,46	0,00748	0,00347
0,61	0,78	0,34	0,20	169.898,43	0,00719	0,00322

Tabla 5. Resultados ensayo de placa plana sin burbujas

ENSAYO PLACA PLANA CON BURBUJAS						
Velocidad [m/s]	Fuerza [N]	Fn	CT [x1e-3]	Rn	ITTC	ITTC LAMINAR
0,24	0,44	0,14	0,71	67.959,37	0,00935	0,00509
0,29	0,54	0,16	0,62	80.701,75	0,00888	0,00467
0,32	0,44	0,18	0,41	89.296,55	0,00861	0,00444
0,44	0,49	0,25	0,24	123.444,37	0,00785	0,00378
0,46	0,49	0,26	0,22	129.122,81	0,00775	0,00370
0,52	0,54	0,30	0,19	146.730,46	0,00748	0,00347
0,61	0,78	0,34	0,20	169.898,43	0,00719	0,00322
0,92	0,93	0,52	0,10	258.245,61	0,00644	0,00261

Tabla 6. Resultados ensayo placa plana con burbujas

Con los resultados anteriormente expuestos, se procederá a comparar el valor obtenido en los ensayos realizados con los valores establecidos por la ITTC-78, tanto en régimen turbulento como laminar. Sin embargo, se deberán suprimir los valores que presentan números de Froude superiores a 0,25; ya que este es el valor del número de Froude del Emma Maersk, los valores situados alrededor de 0,50 significarían que el barco estaría planeando, y como es sabido por el tipo de embarcación el anterior hecho no se produce.

Para el cálculo de los valores ITTC se han usado las siguientes expresiones:

$$ITTC = \frac{0.075}{(\log(R_n) - 2)^2} \quad ITTC_{lam} = 1.328 R_n^{0.5}$$

Ecuación 8. Fórmulas de la ITTC

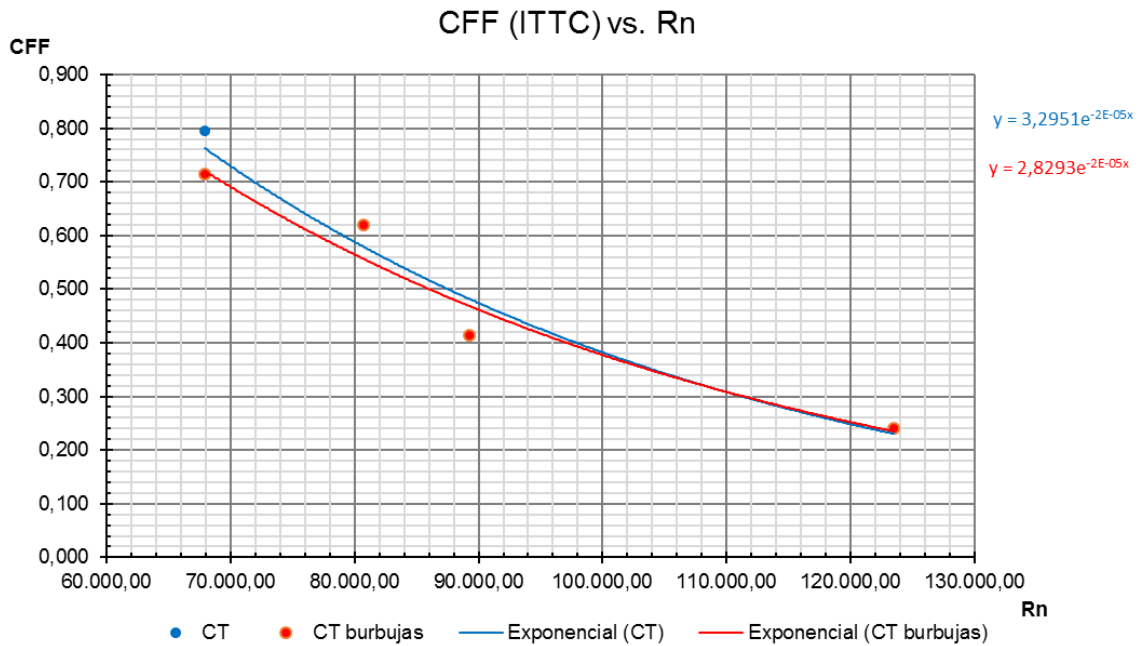


Figura 49. Gráfico de los resultados obtenidos en relacion con Rn

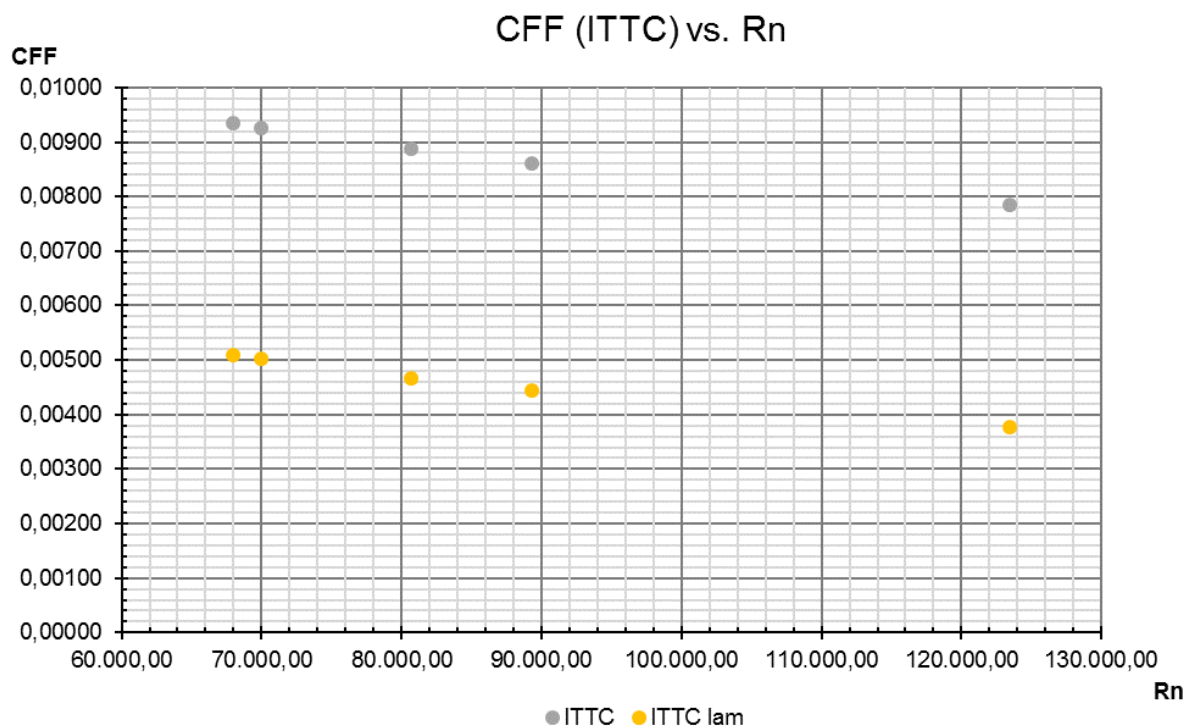


Figura 50. Gráficas de las líneas ITTC

Como se puede observar no existe mucha similitud entre la línea propuesta por la ITTC y la línea obtenida durante la realización de los ensayos descrito, desde el punto de vista de los valores. Sin embargo, existe un enfoque positivo que es la tendencia de los resultados obtenidos, ya que esta sigue a la curva propuesta por ITTC.

La desviación en los valores es muy elevada, debiéndose ajustar en mayor medida a ella, al menos de forma aproximada. El anterior hecho, puede ser debido a que durante los ensayos de placa plana, se hubiera podido generar una resistencia añadida, originada en una posible inclinación de la placa plana cuando esta se estaba ensayando.

En los canales de ensayos hidrodinámicos, el carro encargado de dotar de propulsión al modelo también permite mantener un trimado totalmente horizontal del artefacto, como es sabido y con los medios que se dispusieron para los ensayos descritos, no se pudo asegurar que la placa presentara en todo momento una posición totalmente horizontal.

Aun así es muy remarcable que los ensayos realizados que como aportado, hayan podido contener algún error, presenten una correcta tendencia en relación a la curva propuesta por la ITTC.

7.3.1 Análisis del punto de inyección

Con todos los datos preparados para poder ser llevados a cabo para su correcto análisis, el siguiente paso sería la generación de una gráfica que relacionara dimensiones del Coeficiente adimensional de resistencia total al avance con el número de Reynolds.

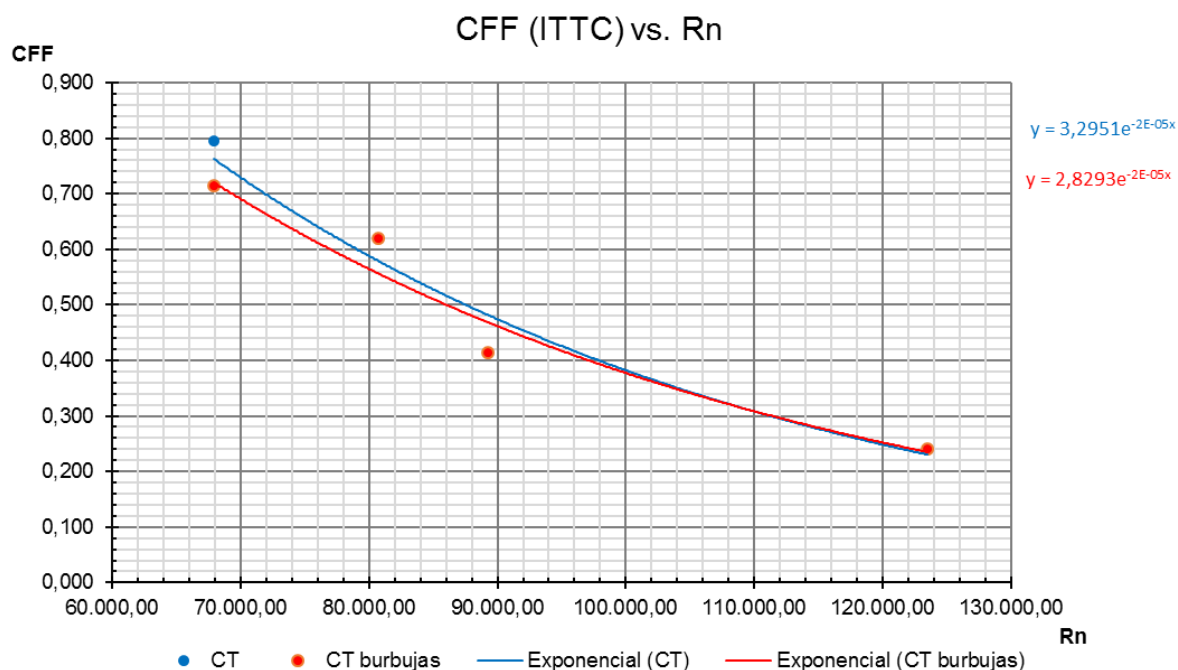


Figura 51. Gráfica CT vs. Rn

De la anterior gráfica varias conclusiones pueden ser extraídas. En primer lugar, el comportamiento de la gráfica es el esperado para este tipo de ensayos, lo que significa que estos han sido llevados a cabo bajo buenas condiciones y que sus resultados son aptos para su análisis.

En segundo lugar, se puede observar que la interacción procedente de las burbujas generadas por electrolisis tuvo un efecto positivo sobre la placa plana ya que, en la zona de mayor influencia de las mismas, al coeficiente adimensional de resistencia al avance se le observa una tendencia a reducirse. Dicho efecto tiene principal afectación en la zona donde los números de Reynolds son menores.

Por la tendencia observada, se debería limitar su efecto principalmente en un rango de números de Reynolds situados entre 70.000 y 100.000. No es necesario aplicar más allá de estos rangos de Reynolds, porque su aportación es menor y de esta forma se ahorraría en consumo eléctrico, o bien se ahorraría en instalación de equipos de generación de microburbujas y al mismo tiempo en alimentación a dichos equipos.

Siguiendo la anterior preposición, para el buque Emma Maersk, deberían insertarse microburbujas comprendiendo esloras que, según cada circunstancia de navegación, buscando su aplicación en régimen turbulento. El motivo porque se usa el régimen turbulento, es para obtener unos resultados lo más próximos a la realidad posible, hallándose los buques casi en su totalidad en régimen turbulento, de esta forma es más fácil poder extrapolar los resultados obtenidos. No obstante, debido a las velocidades de ensayo y eslora del modelo a ensayar, los números de Froude durante el ensayo son más pequeños de lo que se considera óptimo.

Dichos ensayos, entre barco y modelo, son realizados a igualdad de números de Froude; ya que al tener números de Froude reducidos, la resistencia por formación de olas también es reducida, y de esta forma se puede obtener información de la resistencia por fricción.

Debido a la turbulencia generada en números de Reynolds superiores a 100.000, fenómeno observado través del análisis de las microburbujas con la placa plana, la aplicación de la presente técnica no es efectiva, ya que la turbulencia en dicha zona es demasiado elevada. Puede observarse en la parte final de la gráfica que casi no existe diferencia entre la curva de tendencia con burbujas y la curva con tendencia sin burbujas.

7.3.2 Análisis del ensayo de microburbujas

Durante el ensayo para la generación de microburbujas, y tras descartar el método del compresor combinado con un material poroso para la generación de microburbujas, se utilizó para generarlas, el proceso de la electrólisis del agua. Esta afirmación no significa la inaptitud del proceso de generación de burbujas a través de compresores, sino que debería ser estudiado con otros elementos los cuales, durante los experimentos realizados, no se tenía acceso.

De los resultados aportados se puede determinar qué cantidad de microburbujas se pudieron generar mediante la presente técnica. Determinándose que, con corrientes alrededor de 0,43A, se generaba un flujo de burbujas de diámetro 3 cm. No obstante, su dispersión era elevada.

Seguidamente, con las modificaciones realizadas en el circuito eléctrico, se pudo conseguir corrientes de en torno a 0,86A, generando aproximadamente, un flujo parecido al anterior, mejorando no obstante su grado de dispersión.

Finalmente, con todas las mejoras realizadas se llegaron a conseguir corrientes de hasta 5 cm de ancho (en el caso de los ensayos, esta anchura cubría toda la manga del buque), con un grado de concentración elevado y una intensidad circulando alrededor de 2,80A.



Figura 52. Microburbujas generadas a 2,80A

Tras la finalización de los ensayos de generación de microburbujas, y tras haber sacado los ánodos del agua, habiendo transcurrido aproximadamente un total de 5 minutos de ensayo, uno de los ánodos presentaba una capa considerable de oxidación. Siendo este hecho extrapolado en casos de buques reales, cuyas partes fundamentales tales como las hélices, casco y otros apéndices del casco, son metálicas. En caso de que, se aplicara esta técnica para la generación, esas partes sufrirían grandes corrientes de corrosión galvánicas, que en poco tiempo podrían dañar de gravedad los mencionados elementos.

Por lo que, si se planteara el uso de la electrolisis como medio para la generación de microburbujas, se tendría que usar ánodos de sacrificio más duros, para que en vez de durar aproximadamente 2 años (dependiendo del tipo de ánodo, lugar de navegación, materiales de construcción del buque...), o bien, disponer de ellos en más cantidades.

Existen medios contra este tipo de corrosión que consisten en dotar de polaridad contraria a la corriente galvánica generada alrededor del buque para contrarrestar el efecto generado por la electrolisis.

También se ha observado que, con pocas mejoras se pueden obtener mejores flujos de microburbujas, de modo que con una instalación realizada por un especialista en la materia podría permitir obtener mejores flujos.

Asimismo, se pudo comprobar que con un aumento del diámetro de hilo conductor que esté en contacto con el agua, mejor será la transmisión de la electricidad y en mayor relación aumentará el flujo de microburbujas generado.

Una ventaja del uso de este principio es que, la electrolisis se da a lo largo del hilo que se halla en contacto con el agua, comparado con el compresor de aire, que solamente se pudo inyectar de forma puntual.

Finalmente, para este tipo de instalación deberá disponerse de un cable alrededor de la eslora del buque a la cual se dese aplicar el uso de las microburbujas. Al objeto de no aumentar la resistencia al avance del buque por un aumento de la rugosidad superficial del casco, se deberá hallar una solución para acomodar el cable eléctrico que generaría la electrolisis.

Una posible solución sería hacer un perfil en la superficie del casco, que quede relleno únicamente por el cable eléctrico.

7.4 Mejoras en el proceso experimental

Siempre se puede realizar crítica de lo que se ha hecho para mejorar, en el caso de los experimentos llevados a cabo se ha encontrado que ciertos aspectos podrían haberse mejorado una vez se ha tenido la experiencia de los ensayos realizados.

Es importante señalar que no son ensayos fáciles de ser llevados a término, además los instrumentos para tomar medidas son muy específicos y acostumbran a tener precios muy elevados. El objetivo principal era poder demostrar que la técnica es aplicable y si era posible, demostrar que la técnica tiene efectos positivos. Todo ello debía ser realizado con los medios que se disponían.

En primer lugar, indicar que el canal de ensayos caseros, no presento problema alguno, en caso de necesidad este principio de construcción es muy apto para el uso que se tenía en mente. El punto que principalmente se debería mejorar, es el accionamiento de la maqueta. Lo ideal hubiera sido la construcción de un carro que pudiera mover los elementos a ensayar, lo que al mismo tiempo hubiera permitido tener una mejor forma de tomar las lecturas de los experimentos realizados.

Otro punto importante que ha dado quebraderos de cabeza es la sensibilidad del aparato de medida usado. Consultando los modelos disponibles, lo ideal hubiera sido tener dos dinamómetros de distintas escalas.

No solo el dinamómetro, sino también hubiera sido muy interesante tener a mano un medidor laser, para poder medir con mayor precisión el diámetro de las burbujas creadas durante el ensayo de creación de microburbujas.

Durante el proceso de análisis de los resultados obtenidos no se ha podido extraer de forma muy específica conclusiones. No obstante, y habiéndose apoyado en el uso de teorías aportadas en artículos técnicos, por ejemplo, el del profesor Hiroharu Kato, de la universidad de Toyo (Japón) con la ayuda de los cuales se ha podido interpretar objetivamente los resultados.

Idealmente, se habría tenido que realizar los ensayos muchas veces para poder identificar los patrones a través de los cuales sacar conclusiones sin tener que tomar artículos técnicos como referencia.

Debido a las condiciones con las que se han tenido que llevar a cabo los ensayos, muchas variables no han sido tomadas en consideración al objeto de poder simplificar la ejecución de los

misimos. Prueba de ello, es la poca precisión en el control de la velocidad a la que se realiza el ensayo.

Se obtuvieron números de Reynolds demasiado bajos, lo que no ha permitido poder extrapolar con facilidad los resultados obtenidos a la realidad. Para poder obtener mayores números de Reynolds, se debería proceder con la construcción de una maqueta de dimensiones superiores, lo que a su vez, conllevaría la necesidad de un canal de ensayos de mayor envergadura.

Finalmente, hubiera sido interesante haber tenido acceso a equipos sofisticados, como compresores de aire con regulador de caudal y presión, materiales como membranas semipermeables y materiales altamente porosos. También hubiera sido positivo tener al alcance un generador de ondas ultrasónicas para realizar test con dichos equipos. Sin embargo, con los resultados obtenidos se ha sido capaz de obtener unos resultados no precisos a nivel cuantitativo mas se ha podido observar a nivel cualitativo que la aplicación de la presente técnica aporta una reducción tangible de la resistencia al avance.

8. Otros ensayos a realizar

8.1 Consideraciones

Los ensayos expuestos a continuación son los que se deberían llevar a cabo para aumentar un grado más el conocimiento en este campo. Además de lo anterior, sería interesante estudiar otras aplicaciones parecidas a las de las microburbujas, como son las cavidades de aire y capas de aire, estas técnicas son de difícil experimentación.

8.1.1 Ensayo del casco con cavidades de aire

Para llevar a cabo el ensayo con cavidades de aire, se deberá realizar una modificación del modelo a escala. Con la ayuda del mismo programa informático de diseño en 3D, se obtiene un modelo cuya forma en la parte inferior se ve modificada, si bien es cierto, en caso de ser positivo el resultado del ensayo y poder ser considerado para usar en modelos reales, el buque en cuestión perdería cierto volumen de carga.

El modelo modificado obtenido, destaca por tener unas cavidades en la zona plana de la quilla (o línea base) que se extienden por toda la eslora (de la zona plana). Esta zona cuando el buque se halle a flote deberá ser rellenada continuamente con aire comprimido al objeto de mantener alejada el agua del casco. Con esto se obtiene una disminución de la superficie mojada, y teóricamente debería obtenerse una reducción de la resistencia viscosa y a su vez de la resistencia total al avance.

Al objeto de mantener las cavidades llenas de aire, se instala una manguera conectada a la cavidad, la cual mediante el programa de diseño gráfico se le ha realizado un agujero para la instalación de la mencionada manguera que se halla conectada a un compresor, el cual nos aporta aire comprimido.

No pudiéndose determinar de forma teórica el caudal y presión de trabajo, se deberá ajustar en modo prueba y error, asegurándose que el aire se mantiene alejado de la superficie del buque.

Del mismo modo que en los ensayos realizados, el modelo esta vez con la mencionada manguera conectada se acciona mediante el uso de un carro que le proporcionará al modelo la velocidad establecida para el ensayo.

Igual que como ya se ha hecho, se deberá realizar el ensayo unas cuantas veces para obtener datos suficientes para llevar a cabo un estudio.

Llegados a este punto, se presenta un punto de inflexión sobre el cual tomar decisiones o bien avanzar, en base a los resultados obtenidos. Si la fuerza necesaria para el empuje del buque es menor no deberemos realizar ninguna actuación sobre el buque. En caso contrario, si se obtiene una resistencia superior o igual, se debería estudiar y plantearse el motivo.

El motivo por el cual se pudiera ver aumentada la resistencia al avance es porque la tener una superficie de aire relativamente elevada, se puede generar un aumento en la resistencia por formación de olas. Para solucionar el problema se tendría que replantear la forma que se ha dispuesto la cavidad, o bien tratar de realizar varias cavidades más pequeñas a lo largo de la eslora, para tratar de minimizar el problema de la resistencia por formación de olas.

8.1.2 Ensayo del casco con capa de aire

Otra de las técnicas comentadas con anterioridad para la reducción de la resistencia al avance, es el uso de una capa de aire alrededor del buque. El problema de esta técnica es que no solamente se trata de aplicar aire en muchos puntos para tratar de formar un gran cojín de aire que rodee el casco del buque, este hecho solo generaría burbujas de gran tamaño que afectarían negativamente al flujo turbulento que rodea el casco.

Una de las posibles soluciones que se podría probar, es tratar de usar algún tipo de sustancia hidrofóbica, que permitiera que el agua no estuviera en contacto directo con el casco del buque, generando de una forma indirecta una fina capa de aire.

A la hora de realizar el ensayo, se seguirán las pautas marcadas en los anteriores intentos, procediendo con la anotación de los resultados. Se podrá usar el mismo modelo usado para el primer experimento, sin modificaciones en sus formas, ya que solamente se trata de obtener una capa de aire alrededor, lo que no requiere ninguna modificación.

Uno de los problemas del uso de esta técnica es la extrapolación para obtener un resultado a escala real, ya que los productos hidrofóbicos a modo industrial hay pocos y los pocos que hay o bien se hallan en experimentación o su adquisición es complicada debido al precio de los mismos. No obstante a lo anterior, la obtención de unos resultados para este tipo de solución puede ser positiva, al fin de incentivar la búsqueda de pinturas y/o recubrimientos para este fin.

8.1.3 Ensayo de la navegabilidad y maniobrabilidad

En algunos artículos consultados, se han realizado ensayos para determinar si la navegabilidad y maniobrabilidad quedarían afectadas si se aplicara la técnica que se ha presentado a lo largo del trabajo. Por ejemplo, en el artículo del International Conference on Ship Drag Reduction, se puede comprobar los ensayos realizados.

Los resultados presentados de dichos ensayos son positivos, ya que de ningún modo la maniobrabilidad y la navegabilidad queda afectada por la aplicación de la lubricación por aire.

El ensayo presentado es objeto de interés, y podría ser realizado en ocasiones futuras mediante el uso de una maqueta parecida a la usada, pero de tamaño superior. Además, esta maqueta debería tener medios de gobierno propios, para poder llevar a cabo dichas maniobras.

En primer lugar, se debería realizar ensayos de grandes distancias, en varias carreras, y con un rumbo fijado, teniendo el sistema de lubricación por aire activado. De este debería comprobarse si el buque es capaz de mantener el rumbo que se le ha fijado sin tener que realizar modificación alguna.

Seguidamente, debería realizarse varios ensayos realizando viradas a distintos grados a babor y estribor. En este caso, y usando la misma maqueta que se ha mencionado, los ensayos deberían realizarse en primer lugar con los equipos de generación de microburbujas parados. Tras la finalización de estos experimentos, se debería encender el sistema de generación de microburbujas, y proceder con las maniobras descritas en las mismas condiciones.

Comparando los resultados debería ser suficiente para determinar si la embarcación quedaría afectada por el uso de las microburbujas como medio reductor de la resistencia al avance.

Conclusiones

Tras haber estudiado una de las formas de la reducción de la resistencia al avance como lo es la lubricación del casco por aire y haber contrastado con las posibles variables de la técnica, existen varios motivos por los cuales es interesante disminuir el consumo de combustible a bordo; entre ellos el respeto por el medio ambiente y el precio que presenta actualmente el petróleo. Como se ha expuesto a lo largo del presente trabajo, el principal enemigo para el consumo de combustible es la resistencia que opone el agua cuando un barco quiere avanzar a través de ella.

A través de la lubricación por aire, se pretende abrir una nueva salida al problema que desde hace tiempo pone en vilo a la industria marina, que es alimentar las grandes maquinas que dan propulsión al buque. Con la aplicación de aire puede demostrarse que el consumo de combustible puede verse reducido aproximadamente en un 10%, según datos de barcos que actualmente tienen instalado este sistema.

Inicialmente, esta técnica nace de la idea de evitar el contacto del agua con el casco del buque, con esto se pretende desprender de la parte que contribuye a generar mayor resistencia al avance a embarcación, que es la viscosidad del agua. De esta idea base, nacen tres formas de aplicación de la lubricación del casco por aire. La inyección de microburbujas, que por su simplicidad es la más usada y desarrollada de las técnicas expuestas; la construcción de cavidades de aire, que es la idea más parecida a la propuesta original (de implementación compleja además de afectar al arqueado bruto de la embarcación y finalmente, la técnica de las capas de aire alrededor del casco, la cual presenta dificultades con su desarrollo, debido a la sofisticación de la técnica.

La inyección de microburbujas, que se conoce como colchón de aire, es la técnica que más se ha desarrollado y la que principalmente se ha implementado. La comprensión de sus mecanismos de funcionamiento resulta incierta, dado que se cree que su papel es el de apaciguador del flujo sito alrededor del casco, por lo que no es tan simple como separar las dos interfaces (agua y casco).

Debido al sentido de avance del buque, se coloca la inyección de microburbujas en la zona de proa de la embarcación. Para asegurar su efectividad, se deben instalar varios puntos de inserción.

Si bien, se ha demostrado a través de las prácticas realizadas que su aplicación puede ser limitada a una zona del buque, evitándose un gasto excesivo en la creación de las microburbujas.

Su aplicación puede ser perjudicial dado que cualquier contacto de las burbujas con el propulsor puede resultar en una disminución del rendimiento propulsivo, contrarrestando el efecto positivo que pueda generar las microburbujas. Por ello, e deberá instalar un sistema disgregador de las microburbujas inyectadas para asegurar que el flujo no entra en contacto con el propulsor.

Aunque actualmente existen varias firmas que producen en serie los equipamientos necesarios para la instalación de la lubricación por aire, cada barco es un caso distinto que debe ser examinado detenidamente. Para ello se debe realizar un estudio hidrodinámico, para determinar el lugar donde deben ser insertadas las microburbujas y hasta qué números de Reynolds se puede aplicar.

A parte de su simplicidad, uno de los puntos más fuertes que tiene el uso de microburbujas, es que puede ser instalado en cualquier barco, ya sea de nueva construcción o a modo de refit.

En su contra, el sistema es delicado y debe operarse de la forma idónea en caso contrario podría incurrir en generar perturbaciones negativas a la capa límite, produciendo una resistencia extra al avanzar, como le sucedió al buque M/S Till Deymann durante el período de pruebas.

El punto clave para todo lo hablado en el presente trabajo, tiene que ver con la generación y características de la burbuja generada, es decir, si se genera una burbuja demasiado grande, habrá demasiada turbulencia y actuará en contra de lo esperado. A lo largo del trabajo se han aportado nuevas formas para la generación de microburbujas, ideas obtenidas de campos muy variados, como el de la medicina.

Debido a la importancia de ello, se realizaron experimentos para determinar qué tamaño se puede obtener de burbuja según su método de generación. Tras el uso de un compresor de aire combinado con varios materiales porosos y de la electrolisis de agua, se determinó que el tamaño de burbuja necesario para la aplicación de la técnica es la electrolisis del agua. Esta es capaz de generar burbujas muy por debajo de un milímetro y con un caudal adecuado, contrariamente al tamaño que puede generar el compresor de aire, con burbujas de aire obtenidas de alrededor a 3 cm de diámetro.

Para poder comprobar las teorías expuestas y teniendo en cuenta su complejidad, se realizaron varios experimentos con el objetivo de obtener resultados a escala de la implementación y los cálculos teóricos demostrados. Sin embargo, los resultados obtenidos no han sido los esperados, hallándose grandes variaciones respecto a experimentos realizados por el profesor Kato, mas la tendencia obtenida en los mismos es la correcta.

La problemática con la discrepancia de valores se presenta debido a los medios que se dispusieron para llevar a cabo los ensayos, además de algún fallo en la ejecución de alguna de las partes. Sin embargo, el hecho más importante a destacar es que se pudo percibir la reducción de la resistencia al avance por medio de la aplicación de las microburbujas.

Posiblemente, los resultados no hubieran presentado tales desviaciones si se hubiera tenido acceso a instalaciones con el instrumental necesario para que estos ensayos fueran llevados a término de forma precisa. No obstante, se han tratado de superar las dificultades halladas mediante el uso de soluciones propias, como la construcción de un canal de ensayos, la obtención de modelo a escala y el diseño de cada uno de los métodos de ensayo.

Finalmente, con las prácticas realizadas se ha podido experimentar de forma básica el fenómeno de las microburbujas tratando de entender su funcionamiento. Se concluye que habiendo estudiado de forma cualitativa los efectos la técnica expuesta, se ha podido observar la tendencia que presenta la aplicación de la inyección de microburbujas en el casco del buque.

Se han propuesto más prácticas a realizar, ya que no se tenía acceso al equipamiento específico para poder llevar a cabo los antedichos experimentos. Un ejemplo de ellos, es comprobar la maniobrabilidad cuando se aplica la presente técnica.

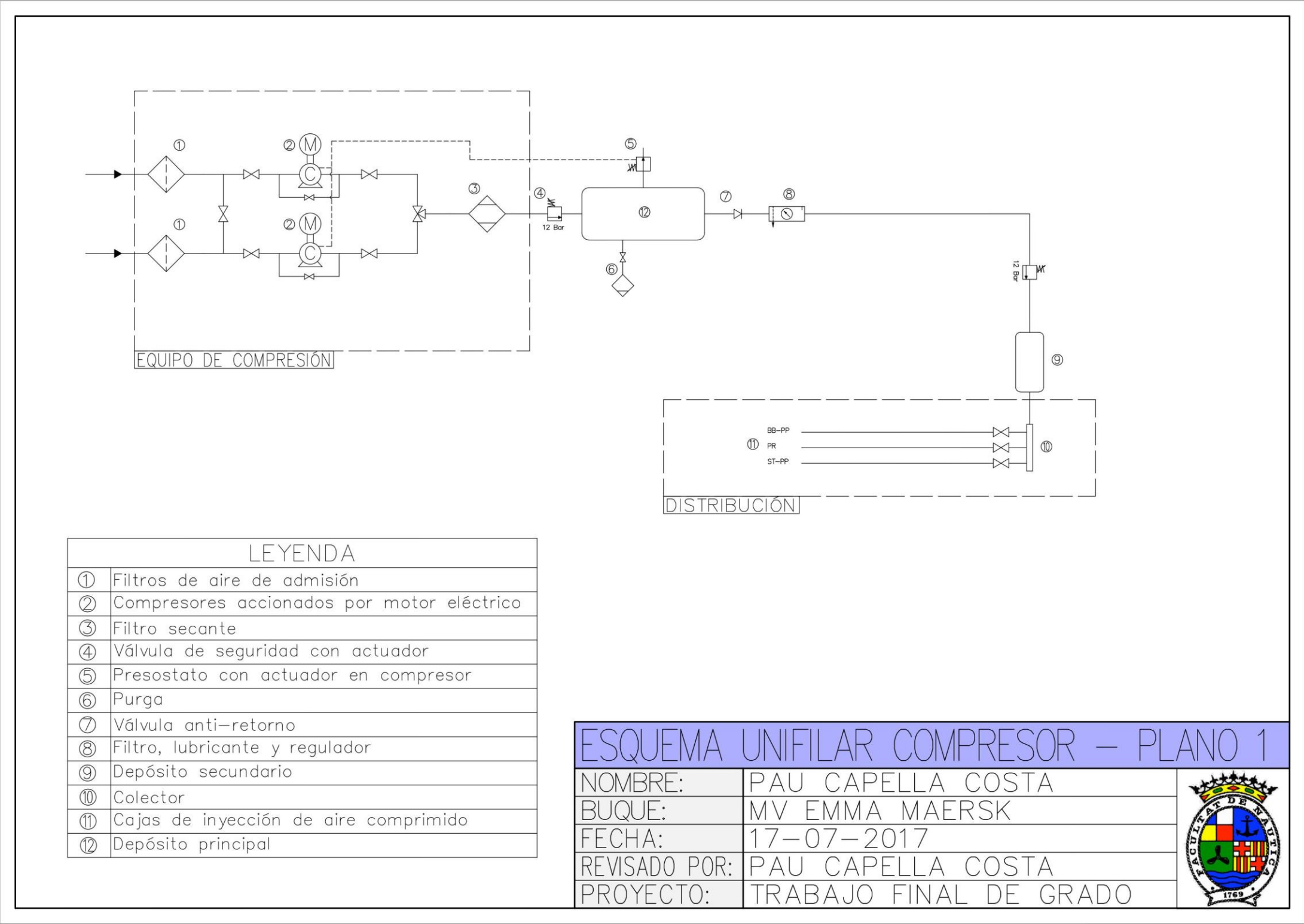
Bibliografía

- [1] T. Final De Grado, A. J. M. Guerrero, and I. Echevarrieta, "Sistemas de reducción de la resistencia al avance en la navegación mediante una capa de aire entre el casco y el agua."
- [2] L. Sánchez Castelló, "La energía de las mareas y la viabilidad de su aprovechamiento," 2016.
- [3] M. Kawabuchi, C. Kawakita, S. Mizokami, S. Higasa, Y. Kodan, and S. Takano, "CFD Predictions of Bubbly Flow around an Energy-saving Ship with Mitsubishi Air Lubrication System," *Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.*, vol. 48, no. 1, 2011.
- [4] "DÍA MARÍTIMO MUNDIAL DE 2016 EL TRANSPORTE MARÍTIMO: INDISPENSABLE PARA EL MUNDO Documento informativo."
- [5] "Sistema de Tubería para Aire Comprimido Air-Pro®," 2014.
- [6] "Vessel details for: TILL DEYMANN (Inland, Motor Tanker, liquid cargo, type C) - MMSI 211511740, Call Sign DA7641 Registered in Germany | AIS Marine Traffic." [Online]. Available: http://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:138292/mmsi:211511740/imo:0/vessel:TILL_DEYMANN. [Accessed: 03-Aug-2017].
- [7] "Las membranas impermeables y transpirables: el santo grial del mundo outdoor | O Blog." [Online]. Available: <https://os2o.com/blog/las-membranas-impermeables-y-transpirables-el-santo-grial-del-mundo-outdoor/>. [Accessed: 19-Aug-2017].
- [8] "tomademar.jpg (200×150)." [Online]. Available: <https://belenos.files.wordpress.com/2008/02/tomademar.jpg>. [Accessed: 19-Aug-2017].
- [9] "ICS | Comparison of CO2 Emissions by Different Modes of Transport." [Online]. Available: <http://www.ics-shipping.org/shipping-facts/environmental-performance/comparison-of-co2-emissions-by-different-modes-of-transport>. [Accessed: 22-Apr-2017].
- [10] "Shinichi TAKAO, et al. -- Mitsubishi Air Lubrication System -- articles & patents." [Online]. Available: <http://www.rexresearch.com/mals/mals.htm>. [Accessed: 01-Sep-2017].
- [11] "Air lubrication." [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/air-lubrication>. [Accessed: 20-Aug-2017].
- [12] "FRL Filtro Regulador Lubricador definición mundocompresor.com." [Online]. Available: <https://www.mundocompresor.com/diccionario-tecnico/frl>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [13] "Micro-bubble system helps Quantum to whopping 20% efficiency gain on Oasis." [Online]. Available: <http://www.seatrade-cruise.com/news/news-headlines/micro-bubble-system-helps-quantum-to-whopping-20-efficiency-gain-on-oasis.html>. [Accessed: 19-Aug-2017].
- [14] "Método para la producción de micro- y nano-burbujas monodispersas mediante co-flujo

giratorio,” 2009.

- [15] “Cómo crear un difusor de microburbujas: ¿Un proceso para especialistas? | Planeta LaboresPlaneta Labores.” [Online]. Available: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.planetalabores.com/2014/02/como-crear-un-difusor-de-microburbujas-un-proceso-para-especialistas/&gws_rd=cr&ei=CVuYWf2nNYXZwALYu4_ABw. [Accessed: 19-Aug-2017].
- [16] “How Air Lubrication System for Ships Works?” [Online]. Available: <http://www.marineinsight.com/green-shipping/how-air-lubrication-system-for-ships-work/>. [Accessed: 20-Aug-2017].
- [17] “PRECIOS DE LOS COMBUSTIBLES.” [Online]. Available: http://portalweb.cammesa.com/memnet1/revistas/estacional/precios_de_combustibles.html. [Accessed: 22-Apr-2017].

Annexo 1: Diagrama unifilar sistema comprimido



Annexo 2. Plano de disposición de equipos

